



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**MOŽNOST VYUŽÍVÁNÍ BETONOVÝCH RECYKLÁTŮ
PRO VÝROBU KONSTRUKČNÍCH BETONŮ**

THE POSSIBILITY OF USING RECYCLED CONCRETE FOR THE PRODUCTION
OF STRUCTURAL CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Erika Pijáčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Erika Pijáčková
Název	Možnost využívání betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace

ČSN EN 12 620 - Kamenivo do betonu

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje, Science Direct apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době nastává výrazný nedostatek přírodních zdrojů kameniv, jako plniva do betonů. Je to způsobeno jednak nárůstem výroby betonů, ale především dožíváním stávajících lomů a pískoven a neotvíráním nových lokalit. Na druhé straně vzniká velký objem demolic starých betonových konstrukcí např. při rekonstrukci dálniční sítě, demolic mostů a skeletových staveb. V současnosti je většina betonů z demolic předrcena na frakci 0-63 mm a buď použita jako záspy na stavbách nebo je ukládána na skládky. Přichází se takto o potenciálně zajímavý materiál, který po vytřídění může být použit hlavně jako hrubé kamenivo do betonů.

Cílem práce bude popsat možnosti betonových recyklátů, jako částečné či úplné náhrady přírodních kameniv pro výrobu konstrukčních betonů pevnostních tříd C16/20 až C30/37. Sestavte informace ze zahraničí, zejména popisující rozdílnost vlastností v betonových recyklátech s ohledem na jejich původ, dopady na výsledné vlastnosti betonů, omezující faktory pro využití a mezní objemy s ohledem na původ matečného betonu, pro jednotlivé pevnostní třídy. Dále popište možnosti využití pro jednotlivé stupně vlivu prostředí dle ČSN EN 206. Zjistěte, jaké jsou legislativní omezení pro využívání betonových recyklátů v ČR dle ČSN EN 206, ČSN 73 2404 či ČSN EN 12 620. Popište rozdíl mezi technickými vlastnostmi betonových recyklátů a přírodních kameniv a dopady na fyzikálně-mechanické a trvanlivostní vlastnosti zatvrdlých betonů.

V praktické části navrhnete receptury betonů pro pevnostní třídy C16/2, C 25/30 a C30/37 s D_{max} 22mm a konzistenci S3 s hrubým přírodním kamenivem a betonových recyklátem. Frakci 0/4 mm použijte přírodní kamenivo. Porovnejte ekonomické náklady na 1 m³ betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem

Rozsah práce cca 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje tématu betonového recyklovaného kameniva a jeho využitím v oblasti konstrukčních betonů. Cílem práce byl popis možnosti úplného či částečného nahrazení přírodního kameniva betonovým recyklovaným kamenivem pro betony pevnostních tříd C 16/20 až C 30/37. Teoretická část je složená z poznatků jak tuzemských tak zahraničních výzkumů a legislativy, které byly využity pro zhodnocení možnosti čtenějšího využívání betonového recyklovaného kameniva v pozemním stavitelství v ČR. Experimentální část je tvořena návrhem receptur betonů s přírodním i betonovým recyklovaným kamenivem a jejich ekonomickým zhodnocením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stavební a demoliční odpad, recyklace, přírodní kamenivo, betonové recyklované kamenivo, betonový recyklát, recyklovaný beton

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the topic of recycled concrete aggregate and its use in the field of structural concrete. The aim of the work was to describe the possibility of complete or partial replacement of natural aggregates with recycled concrete aggregates for concretes of strength classes C 16/20 to C 30/37. The theoretical part is composed of findings from both domestic and foreign research and legislation, which were used to evaluate the possibility of more frequent use of recycled concrete aggregates in civil engineering in the Czech Republic. The experimental part consists of the design of concrete recipes with natural and concrete recycled aggregates and their economic evaluation.

KEYWORDS

Construction and demolition waste, recycling, natural aggregates, recycled concrete aggregates, recycled concrete

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Erika Pijáčková *Možnost využívání betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů*. Brno, 2021. 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Možnost využívání betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

Erika Pijáčková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Možnost využívání betonových recyklátů pro výrobu konstrukčních betonů* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

Erika Pijáčková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ:

Velice děkuji vedoucímu mé práce prof. Ing. Rudolfovi Helovi, CSc., za poskytnutí cenných rad ohledně bakalářské práce, vstřícný přístup a podporu.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Přírodní kamenivo	2
2.1. Těžba stavebního kamene	3
2.2. Těžba šterkopísku	4
2.3. Dopad na životní prostředí	5
2.4. Rekultivace prostředí	5
3. Stavební odpad.....	6
3.1. Dopad na životní prostředí a trvale udržitelný rozvoj.....	8
3.2. Cirkulární ekonomika	10
3.3. Možnosti zpracování	11
3.4. Recyklace stavebního odpadu.....	13
3.4.1. Recyklace sestupného typu	14
3.4.2. Recyklace vzestupného typu.....	15
3.4.3. Recyklace preventivní.....	16
3.5. Recyklační stroje a zařízení	16
3.5.1. Stacionární recyklační linky.....	17
3.5.2. Semimobilní recyklační linky	19
3.5.3. Mobilní recyklační linky	20
4. Betonový recyklát.....	21
4.1. Legislativa a požadavky.....	21
4.2. Vlastnosti	26
4.2.1. Faktory ovlivňující vlastnosti recyklátu.....	27
4.2.2. Geometrické vlastnosti recyklovaného kameniva.....	30
4.2.3. Fyzikální vlastnosti recyklovaného kameniva	31
4.2.4. Chemické vlastnosti recyklovaného kameniva	33
4.3. Využití.....	34
4.3.1. Využití recyklátů drobné zrnitosti.....	34
4.3.2. Využití recyklátů v České republice	35
4.3.3. Využití recyklátů ve světě.....	36
4.3.3.1. Indie	36
4.3.3.2. Čína	36
4.3.3.3. Brazílie	36
4.3.3.4. Velká Británie	37

5. Konstrukční beton s betonovým recyklátem	39
5.1. Legislativa a požadavky	39
5.2. Vlastnosti betonu.....	40
5.3. Využití betonu s recyklovaným kamenivem.....	45
6. Experimentální část	47
6.1. Cíl.....	47
6.2. Návrh receptur.....	47
6.3. Navrhované suroviny	51
6.3.1. Cement	51
6.3.2. Kamenivo	52
6.3.3. Plastifikační přísada	52
6.3.4. Voda	52
6.4. Ekonomické náklady navrhovaných receptur	53
7. Závěr	55
8. Seznam použitých zdrojů a literatury	57
9. Seznam obrázků	60
10. Seznam tabulek	61
11. Seznam grafů	61

1. Úvod

Nejen v České republice, ale i ve světě dochází posledními lety k velkému nárůstu objemu stavebního a demoličního odpadu. Dochází ke zvětšení skládkových prostranství, k zabírání zemědělských půd a hlavně ke znečišťování životního prostředí. Dalším problémem je produkce a celkové zásoby stavebního kamene a štěrkopísků, kdy reálně hrozí vyčerpání těchto materiálů do 100 let. Proto je nutné se zaměřit na produkci materiálu, který by předešel těmto problémům a tím je například betonový recyklát. K primární recyklaci stavebních a demoličních sutí docházelo již během 2. světové války, kdy veškeré roztržení materiálů probíhalo ručně. V dnešní době nám k recyklaci stavebního materiálu slouží celá škála recyklačních linek, které jsou složeny z různých drtičů, třidičů a separátorů. Recyklací demoliční sutě získáme různé druhy recyklátů, kdy nejdůležitějšími recykláty jsou betonové a cihelné. Recyklované kamenivo se dříve užívalo pro vytváření zásypů a násypů či jako podkladové a podsypné vrstvy. V posledních letech se betonový recyklát prosazuje pro nahrazení přírodního kameniva v betonu. Ovšem jeho vlastnosti jsou zatím s vlastnostmi kameniva přírodního nesrovnatelné. Nejvíce rozdílnou vlastností je nasákavost, která je v případě recyklovaného kameniva několikanásobně vyšší, z důvodu pórovitosti cementového tmele, kterým je recyklát převážně tvořen. Proto se laboratoře zaměřují na úpravu betonového recyklátu, tak aby měl vlastnosti alespoň srovnatelné k přírodnímu kamenivu a stal se jeho plnou náhradou. Problémem v oblasti recyklátů jsou i jejich odlišné vlastnosti. Je to dáno kvalitou původního materiálu, obsahem přírodního kameniva v recyklátu a hlavně kvalitou provedené recyklace. V zemích EU, kde se recyklací zabývají dlouhodoběji jsou vybaveni kvalitnějším recyklačním vybavením, například stacionárními linkami. Vlastnosti betonového recyklátu a matečního materiálu ovlivňují vlastnosti výsledného betonu. Recyklované betony mají zhoršené vlastnosti oproti betonům s kamenivem přírodním, proto není ještě zdaleka možné s plnou jistotou betonový recyklát využít v konstrukčních betonech. Řešením by mohl být kvalitněji provedený proces recyklace materiálu i tuzemský intenzivní výzkum vlivů tohoto recyklovaného kameniva.

2. Přírodní kamenivo

Podle ČSN 72 1510 je kamenivo pro stavební účely definováno jako anorganický, zrnitý, sypký, přírodní nebo umělý materiál s maximální velikostí zrn do 125 mm. Kamenivo se hojně využívá ve stavebnictví díky svým dobrým mechanickým vlastnostem, mezi které patří pevnost, hutnost, odolnost proti povětrnostním vlivům, odolnost proti ohni a trvanlivost v čase. Výhodou kameniva je také snadná opracovatelnost a vytváření požadovaných tvarů. Naopak nevýhodou kameniva je vysoká hmotnost. [1]

Kamenivo je společně s vodou a cementem neodmyslitelnou součástí betonových záměsí, kde zaujímá zhruba 75 % celkového objemu. V betonu kamenivo vytváří pevnou kostru a použitím různých velikostí zrna kameniva ve vhodném poměru docílíme snížení mezerovitosti betonu. Kamenivo lze podle frakce zrna rozdělit na jemné, drobné a hrubé. Jemné kamenivo se vyznačuje maximální velikostí zrna do 0,25 mm nebo 0,125 mm a do této kategorie řadíme moučku a filer. Do drobného kameniva řadíme písek s největší velikostí zrna do 4 mm. Hrubé kamenivo má největší frakci do 125 mm a do této kategorie spadá štěrk a drť. Dále kamenivo dělíme na štěrkopísek čili směs těžného hrubého a drobného kameniva a na štěrkodrt' čili směs drceného hrubého a drobného kameniva, tyto směsi jsou často omezeny velikostí největšího zrna. Kamenivo můžeme dále rozdělit podle vzniku na přírodní těžené a drcené. [2]

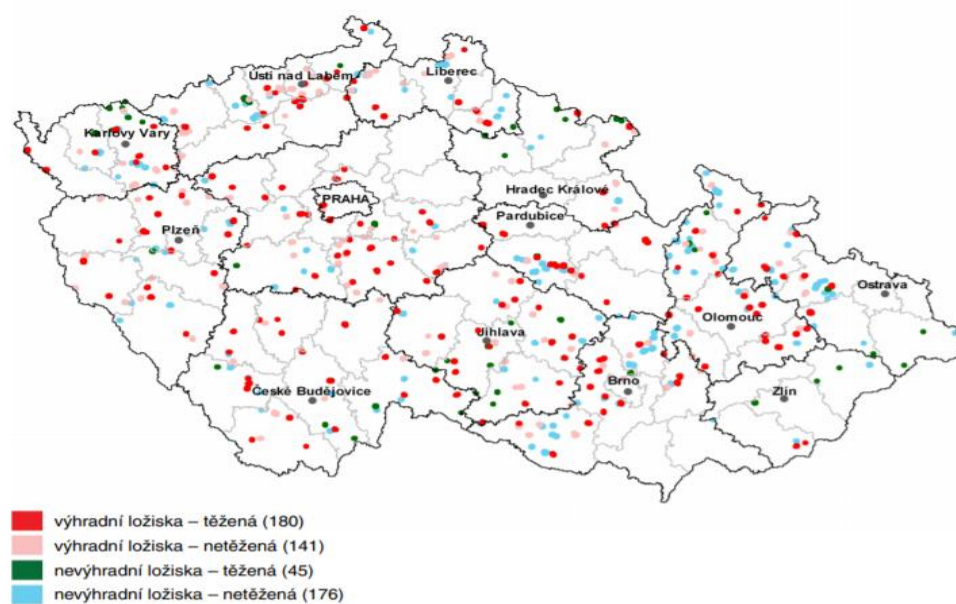
Mezi nejdůležitější posuzované fyzikální vlastnosti přírodního kameniva patří pevnost. Pevnost kameniva stanovíme jako pevnost v tlaku vlastního kameniva nebo stanovíme pevnost kameniva stlačením ve válci (u pórovitého kameniva). Minimální pevnost kameniva v tlaku je 40 až 100 MPa. Další důležitou vlastností kameniva je měrná hmotnost, kdy výsledná hodnota zkoušky je hmotnost objemové jednotky zrna, bez pórů. Zatímco objemová hmotnost je počítána se zrny kameniva včetně pórů. Sypnou hmotnost kameniva, stanovujeme ve dvou stavech, a to ve stavu setřeseném a ve stavu volně sypaném. Další stanovované fyzikální vlastnosti kameniva jsou pórovitost a nasákavost. Nasákavost vyjadřuje množství vody, které kamenivo pojme za dobu 24 hodin při úplném ponoření. Výsledná nasákavost je vyjádřena v procentech hmotnosti vysušeného kameniva. Pórovitost je dána poměrem objemu pórů ku objemu pevné fáze a je vyjádřena v procentech celkového objemu. [2]

2.1. Těžba stavebního kamene

V roce 2018 bylo v České republice evidováno 321 výhradních ložisek a 221 nevýhradních ložisek stavebního kamene. Z celkových 321 výhradních ložisek je těženo pouze 180 a z celkových 221 nevýhradních ložisek je těženo pouze 45. Výhradními ložisky jsou ložiska výhradních nerostů. Těžba stavebního kamene za rok 2018 se pohybuje kolem 40 mil. tun, což je nejvyšší číslo od roku 2014 a jedná se o celkovou těžbu z výhradních i nevýhradních ložisek. [3]

Stavební kámen

1. Evidovaná ložiska a ostatní zdroje České republiky



Obr. 1: Ložiska stavebního kamene v České republice [3]

Rok	2014	2015	2016	2017	2018
Počet ložisek celkem	319	320	320	321	321
z toho těžených	172	166	176	178	180
Zásoby celkem, tis. m ³	2 373 413	2 416 382	2 400 765	2 427 689	2 439 218
bilanční prozkoumané	1 142 842	1 165 330	1 160 712	1 179 031	1 118 023
bilanční vyhledané	1 086 152	1 107 722	1 097 145	1 103 824	1 172 439
nebilanční	144 419	143 330	142 908	144 827	148 756
vytěžitelné	649 252	665 434	1 257 960	713 100	744 315
Těžba výhrad. lož., tis. m ³	12 341	13 740	12 385	12 776	14 140

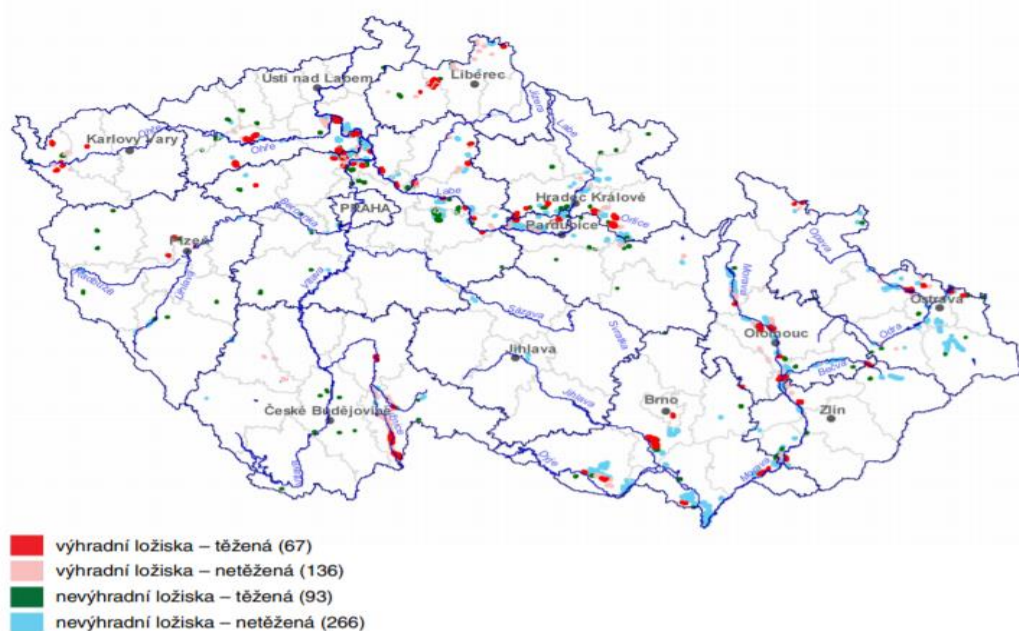
Obr. 2: Rozsah těžby a zásob stavebního kamene v letech 2014-2018 [3]

2.2. Těžba štěrkopísku

V roce 2018 bylo v České republice evidováno 203 výhradních ložisek pro těžbu štěrkopísku a celkem 359 nevýhradních ložisek. Z celkových 203 výhradních ložisek bylo v roce 2018 těženo z 67 ložisek a z celkových nevýhradních ložisek štěrkopísku bylo těženo z 93 ložisek. V roce 2018 bylo vytěženo celkově zhruba 20 milionů tun štěrkopísku z výhradních i nevýhradních ložisek. [3]

Štěrkopísky

1. Evidovaná ložiska a ostatní zdroje České republiky



Obr. 3: Ložiska štěrkopísku v České republice [3]

Rok	2014	2015	2016	2017	2018
Počet ložisek celkem	205	204	203	203	203
z toho těžených	77	69	69	69	67
Zásoby celkem, tis. m ³	2 107 455	2 099 731	2 114 371	2 106 593	2 100 538
bilanční prozkoumané	1 084 172	1 077 433	1 078 027	1 070 659	1 072 587
bilanční vyhledané	794 870	793 371	797 577	798 996	786 625
nebilanční	228 413	228 927	238 767	236 938	241 326
vytěžitelné	381 288	406 787	444 784	375 261	744 315
Těžba výhrad. lož., tis. m ³	5 753	6 063	6 143	6 198	6 499

Obr. 4: Rozsah těžby a zásob štěrkopísku v letech 2014-2018 [3]

2.3. Dopad na životní prostředí

Těžba stavebního kamene a šterkopísků probíhá jako těžba povrchová. V přírodě nám tedy vznikají otevřené jámy, což vede ke dramatické změně rázu krajiny. Velké plochy krajiny jsou zbaveny vegetačního krytu, jsou zabrány lesy, které jsou následovně pokáceny, dochází k zabírání zemědělské půdy či k vysídlování obyvatelstva. Povrchová těžba a procesy s ní spojené mohou ohrožovat i koryta řek a vodní zdroje. Dopady těžby na životní prostředí závisí na mnoha faktorech. Pokud se nedodrží preventivní opatření, může být v okolí místa těžby negativně ovlivněna kvalita vod. Nejčastějším následkem těžby stavebního kamene je narušení přirozených vodních tras, či samotného vodního zdroje. Vlivem těžby kameniva dochází k negativnímu ovlivnění kvality půdy. Odkrývky vegetačního krytu způsobují fyzickou změnu krajiny a biologické i estetické narušení. Důsledkem nesprávného řízení územního plánování těžby může rychleji vznikat vodní či větrná eroze, dokonce i záplavy. Kromě nepříznivého působení na kvalitu půdy, dochází i k značnému ovlivnění biotopů, jejichž ohromná část je zničena při výstavbě dolů a jejich využívání. Naopak opuštěné a staré lomy nebo těžební jámy se stávají teritoriem pro vzácné a ohrožené druhy zvířat. [4]

2.4. Rekultivace prostředí

Rekultivace krajiny se zabývá regenerací přírody a jejích částí, které člověk narušil svou činností. Jedná se tedy o rekultivaci fauny a flory, či celých biotopů krajiny. Rekultivace může probíhat třemi způsoby. Prvním způsobem je nechat přírodu volně pracovat a postupně znovu zabírat území. Dalším způsobem je přírodu lehce korigovat a třetím způsobem je možnost vše vysázet či vyset bez ohledu na přírodní ráz krajiny. Třetí způsob se používá při technických obnovách krajiny, nejedná se totiž o přírodní výsledek. Problémem rekultivace je fakt, že obnovené přírodní útvary jako pole, louky či lesy nemají ani původní produkční hodnoty a ve většině případů poškodí vzácné druhy rostlin a živočichů, kteří se stihli usídlit v lomovém prostředí. Mechanické postupy rekultivace, které jsou uplatňovány jsou proto většinou ve sporu s požadavky orgánů na ochranu přírody. Lom či těžební jáma se proto může po svém vytěžení rekultivovat výstavbou parku, či hřiště nebo rekreační zóny. [4]

3. Stavební odpad

V roce 2018 byl podíl vytvořeného stavebního a demoličního odpadu na hodnotě 55,2 %. Konkrétně bylo v 2018 vyprodukováno přes 20 milionů tun stavebního a demoličního odpadu. Tato hodnota v porovnání s rokem 2017 stoupla o zhruba dva miliony tun. Vzrůst produkce odpadu byl zapříčiněn navýšením investic do infrastruktury dále výstavbou dálnic a železničních koridorů. [5]

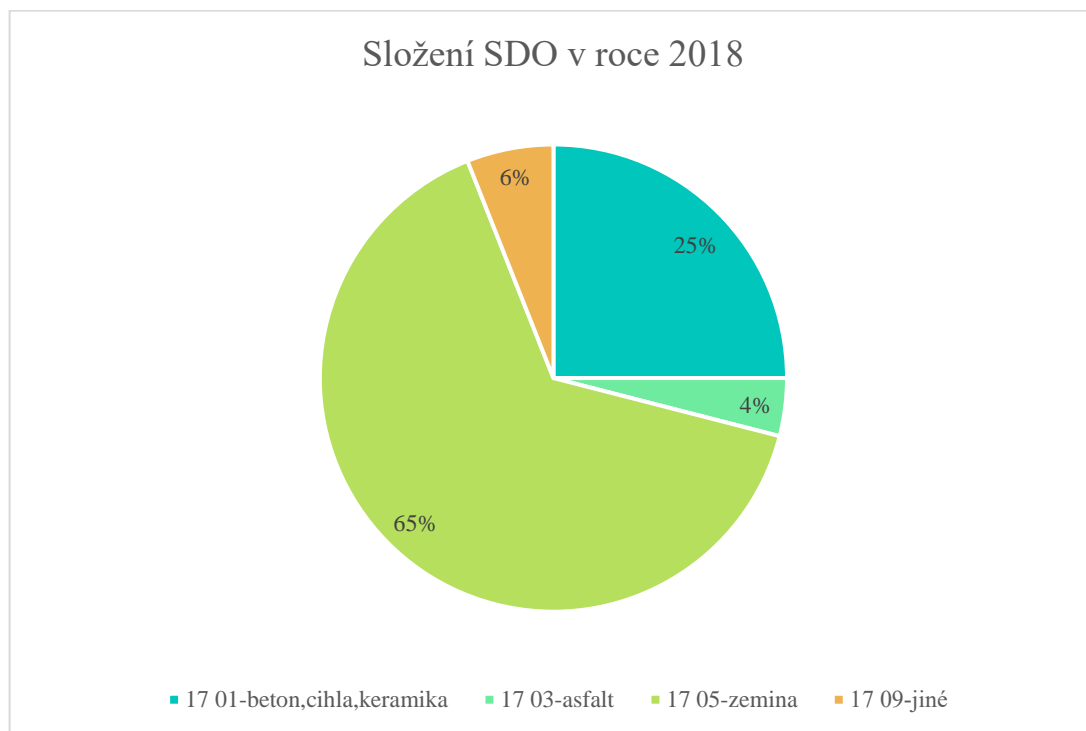
Stavební a demoliční odpad neboli ve zkratce SDO, se podle §5 Zákona o odpadech neřadí do kategorie komunálního odpadu, ale spadá do samostatné skupiny s číslem 17. Tato skupina je pak rozdělena na několik kategorií charakterizujících materiály detailněji. Detailní dělení stavebních odpadů popisuje vyhláška č. 93/2016 Sb., tzv. Katalog odpadů, kde SDO dělíme podle recyklovatelnosti. Mezi recyklovatelné materiály patří beton, cihly, sklo, zemina, tašky a keramické výrobky. Odpady nerecyklovatelné neboli podmíněně vyloučeny z úpravy jsou materiály, obsahující nebezpečné složky (azbest, rtuť, dehet). [6]

skupina	odpad	2013	2014	2015	2016	2017	2018
		[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[kt]	[kt]
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika	3 249	3 688	4 419	4 375	4 416	5 144
17 01 01	Beton	1 292	1 422	1 985	1 755	1 845	2 121
17 01 02	Cihly	757	745	840	889	905	774
17 01 03	Tašky a keramické výrobky	12	16	14	15	15	17
17 01 07	Směsi neuvedené pod č. 17 01 06	1 172	1 473	1 580	1 716	1 651	2 232
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výr. z dehtu	510	573	896	778	757	907
17 03 02	Asfalt. směsi neuvedené pod č. 17 03 01	508	568	891	752	752	907
17 05	Zemina (včetně vytěžených zeminy z kont. míst), kamení a vytěžená hlušina	9 966	11 128	15 650	12 320	11 774	13 495
17 05 04	Zem. a kam. neuvedené pod č. 17 05 03	9 442	10 619	13 916	11 006	10 802	13 147
17 05 06	Vyt. hlušina neuvedená pod č. 17 05 05	130	102	850	527	667	40
17 05 08	Štěrka ze železničního svršku neuvedená pod číslem 17 05 07	80	112	578	399	305	309
17 06	Izol. a staveb. materiály s azbestem	61	66	62	54	40	43
17 06 04	Izol. mat. nev. pod č. 170601 a 03	35	40	42	36	40	43
17 08	Stavební materiál na bázi sádky	9	11	14	17	13	14
17 08 02	Materiály neuvedené pod č. 17 08 01	9	11	14	17	13	14
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady	609	451	722	547	605	713
17 09 04	Sm. SDO nev. pod č. 170901, 02, 03	590	441	709	535	605	713
CELKEM		14 404	15 916	21 891	18 004	17 954	20 844
z toho 1701 + 170302 + 170904		4 330	4 665	6 019	5 662	5 773	6 764
což z celkového SDO činí v %		30%	29%	27%	31%	32%	32%
podíl skupiny 1705 na celkové produkci SDO		69%	70%	71%	68%	66%	65%

Obr. 5: Množství a složení stavebního a demoličního odpadu v letech 2013-2018 [7]

Stavební a demoliční odpad pochází z několika možných zdrojů, mezi nejvýznamnější zdroje řadíme povrchové úpravy, které jsou zdrojem výkopové zeminy, dále demolice a rekonstrukce vozovek, demolice staveb a stavenišť, kde vznikají odpady při stavbách novostaveb anebo při rekonstrukcích stávajících budov. V průběhu povrchových a výkopových prací nám vzniká velký objem odpadu v podobě výkopové zeminy, ve které může být obsaženo malé procento vegetace nebo kameniva, v některých případech i stopy betonu a navážky. Tato zemina se posléze využívá jako zásyp nebo na zarovnání povrchů. Při demolici a rekonstrukci vozovek získáváme odpad v podobě asfaltových ker, které v neporušeném stavu mohou vytvořit nový povrch na méně využívaných vozovkách či cyklostezkách, nebo se asfalt může použít při výstavbě protihlukových stěn. Demolice budov nám vytváří rozmanitou masu odpadu. V největším množství se vyskytuje minerální materiál v podobě cihel či tvarovek, dále betonu či betonových prefabrikovaných dílců a kamene. Při demolici vznikají i odpady v podobě dřeva a kovu a samozřejmě veškerá vedení a vybavení budovy. Staveništní odpady zahrnují tři základní zdroje: zničené materiály, nepotřebné materiály a ztracené materiály.

[6]



Graf 1: Procentuální složení SDO v roce 2018 [7]

3.1. Dopad na životní prostředí a trvale udržitelný rozvoj

Beton můžeme v této době považovat za druhý nejpoužívanější materiál vůbec, proto jsou jeho dopady na životní prostředí velice výrazné. Během výroby a posléze během stavby a využívání betonových konstrukcí můžeme narazit hned na několik vlivů ohrožujících životní prostředí. Těmito vlivy jsou například spotřeba primárních neobnovitelných zdrojů, energetická náročnost výroby, vznik škodlivých emisí CO₂ (cca 30 % v zemích Evropské unie), vysoká hmotnost materiálu tudíž i vysoká hmotnost staveb, hlučnost a prašnost na staveništi, vzniklé odpady a následná energetická náročnost při využívání stavby. Mnoho výrobců betonu už s touto stinnou stránkou výroby pracuje a snaží se omezit vznikající odpady, rekultivovat lomy a snižovat energetickou náročnost vlastní výroby. [8]

Podle odhadů se ve vyspělých zemích na výstavbu stavebních objektů spotřebuje až 40 % celkové energie. Co se týče samotného betonu, jeho využití vzrostlo za posledních padesát let zhruba dvanáctkrát a s nynějším rozmachem 3D tisku betonových konstrukcí lze předpokládat, že využití betonu v dalších letech bude ještě narůstat. Proto je nutné začít uplatňovat principy udržitelného rozvoje, který je v Zákoně o životním prostředí č. 17/1992 Sb. v §6 definován takto: „*Trvale udržitelný rozvoj společnosti je takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachovává možnost uspokojovat jejich základní potřeby, a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystému*“. Při výrobě betonu a výstavbě betonových konstrukcí je důležité zaměřit se na hlavní úkoly stavebnictví zohledňující principy udržitelné výstavby. Prvním úkolem je omezení navyšující se energetické náročnosti, jak výroby vstupních surovin tak výstavby a provozu konečné stavby. Omezení či snížení energetické náročnosti dosáhneme správným opatřením úspory výrobní i provozní energie a pomocí využití obnovitelných zdrojů energie, tedy sluneční a jiných. Dalším důležitým úkolem je snížení spotřeby neobnovitelných přírodních zdrojů jakožto vstupních materiálů. Je zapotřebí přírodní neobnovitelné zdroje materiálů využívat šetrně a efektivně, tedy vést stavebnictví směrem výstavby konstrukcí s dlouhou životností, upřednostňování rekonstrukcí a modernizací před demolicí, recyklace materiálů a jejich opětovné využití, regulace využívání neobnovitelných zdrojů. Dalším úkolem je omezení odpadů a emisí. Tedy snižování emisí CO₂, SO₂, HCFC a dalších, a snižování množství nerecyklovatelných odpadů. Je třeba zaměřit se také na neefektivní nakládání s pitnou

vodou. Při výrobě betonu můžeme využívat recyklované vody, která splňuje požadavky ČSN EN 206-1, v průmyslových výroбах je možné využívat dešťovou vodu. Dalším úkolem je také omezit zabírání půdy a její efektivní využití. Při navrhování a posuzování konstrukcí při zohlednění udržitelné výstavby se musíme zaměřit na tři základní principy a to: komplexnost, časová závislost a pravděpodobnost. Princip komplexnosti je založen na zohlednění všech podstatných částí konstrukce, hlavních parametrů výstavby a kritérií návrhu ze spektra kritérií trvale udržitelného rozvoje. Časová závislost zahrnuje celý životní cyklus konstrukce od plánování až po demolici. Princip pravděpodobnosti je založen na předpokládané nebo pravděpodobné strategii chování stavby – formy užívání, údržba, opravy, rekonstrukce. [9] [10]

Beton jako stavební materiál má ovšem obrovskou výhodu v recyklaci, sám o sobě je až z 90 % recyklovatelný. Proto při správném postupu, při výrobě i demolici, můžeme objem vzniklého stavebního materiálu snížit na minimum. [10]

Tab. 1: Kategorie a kritéria dopadů staveb na životní prostředí [9]

Kategorie dopadu	Kritérium	Úroveň
Potencionál globálního oteplování	Emise skleníkových plynů	Globální
Potencionál poškozování ozónové vrstvy	Emise HCFC aj.	Globální
Okyselování prostředí	Emise SO ₂	Regionální
Eutrofizace vod	Množství živin z odpadních vod (především N a P, ekvivalent PO ₄ ³⁻)	Regionální
Vyčerpávání zdrojů materiálu	Spotřeba neobnovitelných energetických zdrojů a míra využití obnovitelných zdrojů	Globální, regionální
Vyčerpávání zdrojů energie	Spotřeba neobnovitelných energetických zdrojů a míra využití obnovitelných zdrojů	Globální, regionální
Spotřeba kvalitní vody	Spotřeba pitné vody, míra využití dešťové vody	Lokální, regionální
Zastavování půdy		Lokální, regionální
Ukládání nerecyklovatelných odpadů	Skládkování pevných odpadů, likvidace tekutých odpadů	Lokální, regionální
Znečištění ovzduší	Letní a zimní smog	Lokální, regionální
Zdravotní závadnost prostředí		Lokální

3.2. Cirkulární ekonomika

Cirkulární ekonomika neboli oběhové hospodářství je založena na principu vytvoření systému, který umožní udržet hodnotu výrobku co nejdéle v cyklu produkce. Tento systém je ovšem velice významnou změnou v podnikatelském modelu a proto i v dnešní době většina firem zastává spíše ekonomiku lineární, ve které vytváří velké množství odpadů, které ve většině případů končí na skládkách. [11]



Obr. 6: Princip lineární ekonomiky [11]

Cirkulární ekonomika je tedy s ohledem na potencionální nedostatek přírodních zdrojů velmi diskutované téma v mnoha spektrech výrobních aktivit. Ve stavebnictví je toto odvětví často spojováno především s vysokým úbytkem zásob přírodního kameniva. Tento problém není zapříčiněn ani tak množstvím i objemy přírodních ložisek, jako spíše přísnými legislativními omezeními i odporem obyvatelstva vůči rozvoji stávajících těžebních prostor či otevírání nových těžařských území. V České republice nebyl v posledních třiceti letech otevřen žádný kamenolom. Je obecně známým faktem, že stavebnictví je velmi náročné z hlediska čerpání přírodních zdrojů, a tento stav je do budoucna neudržitelný. Z tohoto důvodu je kladen důraz na opětovné používání stavebních materiálů, proto je z hlediska cirkulární ekonomiky nutné zaměřit se na výstavbu nových objektů, ve smyslu jejich plné recyklace po skončení jejich životnosti. Recyklace ve stavebnictví je jedním ze základních úkolů cirkulární ekonomiky. Ve stavebnictví je ovšem stále mnoho oblastí, kde primární nerostné suroviny nahradit nelze, například při výstavbě mostních konstrukcí z vysokopevnostního betonu nebo v pojezdových vrstvách vozovek. Ovšem v mnoha oblastí stavebnictví lze přírodní suroviny nahradit recyklovanými. Především v oblasti náhrady přírodního kameniva za recyklované. Pro dosažení zvýšení podílu recyklovaných stavebních a demoličních odpadů na trhu je potřeba se zaměřit především na výrobu a produkci kvalitních recyklátů

potřebné kvality. Dále zajistit výhodnou cenovou nabídku oproti přírodnímu kamenivu a dosáhnout zajištění takového množství recyklátu, aby byla možná stabilní dodávka materiálu i pro rozsáhlé stavby. [12]



Obr. 7: Princip cirkulární ekonomiky ve stavebnictví [13]

3.3. Možnosti zpracování

V České republice se v nynější době recyklace stavebního a demoličního odpadu pohybuje okolo 60 %, což je srovnatelná hodnota s vyspělými zeměmi ovšem ještě v roce 2004 bylo recyklováno pouze 30 % stavebního a demoličního odpadu. [6]

Tab. 2: Úroveň vybraných zemí EU v recyklaci SDO (údaje z publikace z roku 2011) [14]

Země	Úroveň recyklace SDO
Dánsko	I
Německo	I
Belgie	II
Norsko	II
Litva	III
Česká republika	IV
Finsko	IV
Polsko	IV

Kategorie **I** – Recyklace nad 70 %, kategorie **II** – Recyklace 50-70 %, kategorie **III** – Recyklace 30-50 %, kategorie **IV** – Recyklace pod 30 %

Betonové odpady a úlomky vznikající při demolici betonových částí zástavby, inženýrských sítí či betonových povrchů vozovek jsou relativně čistými materiály pro další použití. V případě železobetonu, který se také řadí do této kategorie, dochází pouze k podrcení a magnetické separaci výztuže. Betonová suť je následně použita jako zásypový materiál, kamenivo železničních svršků nebo pro zpevňovací práce. Kvalitnější betonová suť lze recyklovat a využít jako umělé kamenivo do nového betonu. [6]

Keramické stavební prvky vznikají při demolici nebo rekonstrukci nejrůznějších budov, tyto keramické úlomky jsou poměrně čisté až na občasný výskyt malt a jiných materiálů na povrchu. Cihly a tvarovky se v případě přebytečnosti na konkrétní stavbě dají uschovat a znovu využít, popřípadě můžeme tímto stylem i cihly recyklovat. Použité cihly se podrtí v drtiči na cihelnou suť nebo moučku a používají se jako zásypový materiál, moučka se používá na antukové povrchy sportovišť a v případě kvalitního recyklátu, ji můžeme použít do nového cihlářského výrobku. Cihly, tašky a tvarovky tvoří největší část sutě z demolic a rekonstrukcí staveb. V minulém století tyto keramické stavební prvky silně převažovaly nad ostatními. V současné době se tato situace mění, a především v nebytových domech se výrazným podílem objevuje beton. [6] [15]



Obr. 8: Druhy recyklátů [16]

3.4. Recyklace stavebního odpadu

Recyklace stavebního odpadu má velký význam v oblasti trvale udržitelného rozvoje, životního prostředí ale je významná i pro zachování neobnovitelných přírodních zdrojů. Zpracování demoličního odpadu a betonové suti se začalo objevovat po 2. světové válce, kdy lidé zpracovávaly zbytky zdemolovaných domů. V této době pouze ze sutin vybírali vhodný materiál a ten posléze využili při stavbě nových domů. Od té doby se ovšem recyklace rozvinula úměrně k moderní době. Pro recyklaci dnes můžeme využít několik strojů a zařízení, která nám zaručí kvalitní výstup požadovaného druhu recyklace. [6]

Při demolici či výstavbě, při níž stavební odpad vzniká, je důležité odpad nejdříve rozdělit na recyklovatelný a nerecyklovatelný. Mezi recyklovatelný stavební materiál se řadí například cihelná a betonová suť, dále zemina a živičné suti. Mezi nerecyklovatelný stavební materiál patří kovy, organický materiál a nebezpečné hmoty, jako jsou azbest, různé nátěry a podobně. Nerecyklovatelné materiály se pak ukládají do kontejnerů a odvázejí na místa k tomu určeným a recyklované materiály se roztrídí podle druhu a poté projdou recyklací. [6]

Technologie recyklace se dělí do tří kategorií. První kategorií jsou technologie primární čili bezodpadové. Tato technologie spočívá ve využití odpadů přímo na místě jejich vzniku. Jde tedy o uzavřenou technologii, ve které se odpady vzniklé výrobním procesem vrací znovu do výroby nebo se z nich rovnou vyrábí nový produkt. Pro příklad je to využívání vody, která byla použita na umytí autodomývačů nebo využití zbytků čerstvého betonu. Další kategorií je kategorie sekundární, kdy při výrobě využíváme odpady, které vznikly při jiném technologickém procesu. Díky této technologii zabránujeme rozšiřování skládek a také omezujeme spotřebu přírodních surovin. Příkladem může být pálení odpadů při výrobě cementu a jiných přísad do betonu. Poslední kategorií je terciální technologie, kdy dochází k využití stavebního odpadu pro výrobu nového stavebního materiálu. Tedy využíváme výrobky, které mají kupříkladu ukončený životní cyklus. Do této kategorie řadíme i opětovné využití stavební suti z demolic a rekonstrukcí budov. [17]

3.4.1. Recyklace sestupného typu

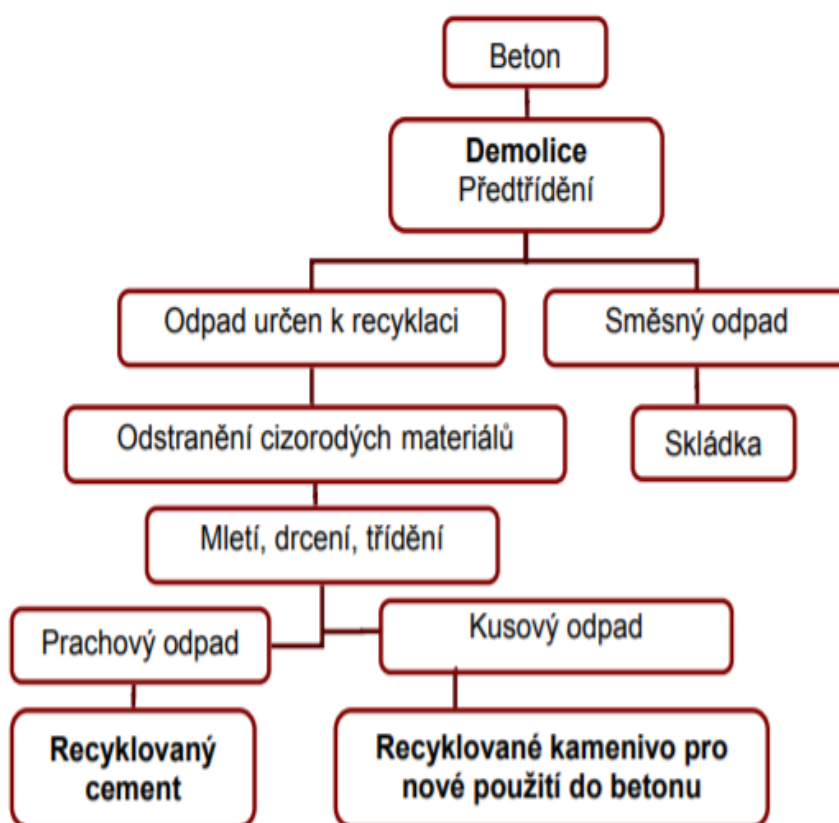
V případě recyklace SDO vždy platí, že kvalita vzniklého recyklátu je přímo úměrná kvalitě provedení demolice. Potvrdilo se, že je mnohem efektivnější provádět třídění demoličního materiálu přímo na místě demolice, kdy můžeme s větším přehledem rozdělit minerální materiály od organických nebo kontaminovaných materiálů. Zatímco třídění až u výrobce recyklátu by bylo více nepřehledné, a hlavně finančně náročnější. Po demolici se tedy roztřídí materiál a je přesunut buď do stacionární recyklační linky nebo je k místu přistaveno mobilní recyklační zařízení. Začátkem 90. let při začínajícím vývoji recyklace SDO se touto tematikou zabývalo jen málo firem, které byly obvykle vybaveny drtiči a třídiči, některé výjimky vlastnili i magnetické separátory, s tím že podniky v této době neměli žádné požadavky na zjišťování kontaminace materiálu. Postupem času a se zvyšujícími se cenami za uložení stavebního a demoličního odpadu se nabídka recyklace SDO zvyšovala. V současné době existuje několik recyklačních firem zabývajících se právě SDO a nabízejících jak stacionární recyklační linky, tak mobilní zařízení. [9]



Obr. 9: Schéma recyklace sestupného typu [18]

3.4.2. Recyklace vzestupného typu

Beton, pro jehož výrobu bylo použito recyklované kamenivo, má ve většině případů zhoršené vlastnosti oproti betonu s přírodním kamenivem. Má sníženou pevnost, nižší modul pružnosti, nižší mrazuvzdornost a vyšší permeabilitu. Opakem této situace je tzv. vzestupná recyklace, kdy dochází ke zlepšení betonu s recyklovaným kamenivem na stejnou či vyšší úroveň jako beton s kamenivem přírodním. Za jednu z hlavních možností zhoršení vlastností betonu se považuje vrstva cementové tmelu, která obklopuje povrch kameniva. Pro zlepšení vlastností tedy musíme tuto vrstvu odstranit, a to pomocí obrusu. Ovšem při použití této metody se opět dostáváme k problematice zvýšení spotřebované energie při výrobě. Tento postup se zatím nevyplatí ani ve vyspělých zemích, kde hrozí akutní nedostatek přírodního kameniva. Druhou možností je cementový tmel chemicky odstranit, tato varianta je ale finančně nákladnější. Recyklace vzestupného typu by tedy měla v budoucnu umožnit beton plně recyklovat. [9]



Obr. 10: Schéma recyklace vzestupného typu [18]

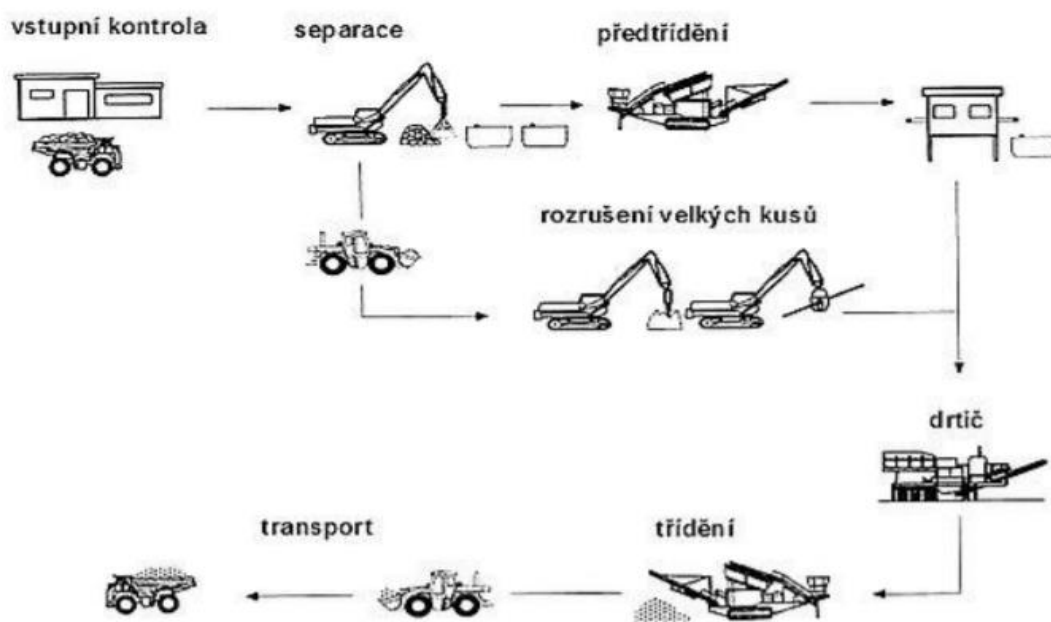
3.4.3. Recyklace preventivní

Preventivní recyklace by měla předcházet zbytečným odpadům, a to tím, že kromě recyklace stavební suti zbylé po demolici, by se lidé měli zaměřit na využívání takových materiálů a dílců, které po životnosti stavby jednoduše v celku použijeme na stavbu jinou. Tedy takové dílce, které nebude potřeba upravovat v drtičích a které budou mít i po letech užívání takové vlastnosti, aby se dali použít pro nové konstrukce. Opětovné použití stavebních dílců se však zatím ve velké míře nevyužívá. Je to způsobeno tím, že stavby určené v této době na demolici ještě nejsou stavěné pro tento účel. Proto recyklaci preventivní můžeme rozdělit do dvou skupin. Prvním druhem je taková recyklace, kdy se dům navrhuje na pozdější demontáž a počítá se s vícenásobným využitím stavby a druhým typem recyklace je destruktivní vyjmutí dílce při demolici a posléze posudek o stavu dílce a o jeho opětovném použití. Tento postup může být využit například při demolici panelových domů. [9]

3.5. Recyklační stroje a zařízení

Pro zahájení recyklace je potřeba rozdělit recyklovatelný a nerecyklovatelný materiál. V případě demoličních či stavebních odpadů je potřeba alespoň většinu roztřídit ručně do kontejnerů. Poté nám mohou pomoci například magnetické separátory, které nám pomohou odstranit výztuž a armovací prvky. Vytříděný recyklovaný materiál se posléze podrtí v drtiči. Jsou různé druhy drtičů kdy mezi nejznámější drtiče patří drtiče válcové, čelistové a kuželové. Tyto drtiče nám podrtí stavební odpad na danou frakci a můžeme ho tak použít pro výrobu nového stavebního materiálu. Recyklaci můžeme provádět za pomoci stacionárních linek nebo mobilních recyklačních linek. Mobilní recyklační linky se většinou umísťují v místech, kde není vyprodukován velký objem SDO. Tedy v místech skládek komunálního odpadu, kde je možné uložit i stavební odpad, nebo přímo na demolicích velkých objektů, kde naopak velký objem odpadu vznikne a bylo by neúsporné jej odvážet na linku stacionární. Průměrná roční kapacita mobilních recyklačních linek je zhruba 2 000-10 000 tun. Pomocí mobilní linky je recyklováno pouze 35 % stavebního a demoličního odpadu. Stacionární recyklační linky zaujímají v evropských zemích zhruba 50 % z celkového počtu. V České republice máme stacionární linky, které jsou s těmito zeměmi nesrovnatelné, fungují na principu jejich semimobilních či mobilních recyklačních linek. Stacionární linky jsou složeny z několika

strojů, mezi nimiž jsou: drtiče, třídiče a separátory. Tento děj potom může probíhat buď na místě demolice, kde je znovu materiál využit i při výstavbě nové budovy anebo na místech k tomu určených (betonárky, kamenolomy, pískovny, recyklační závody). [6] [19]



Obr. 11: Schéma technologie recyklace SDO [20]

3.5.1. Stacionární recyklační linky

Ve vybraných evropských zemích jako je Rakousko, Německo, Nizozemí a Švýcarsko zabírají stacionární recyklační linky asi 40 až 50 % z konečného počtu recyklačních linek. Zbytek tvoří recyklační linky mobilní. Stacionární recyklační linky jsou v dnešní době charakteristické velice rozsáhlým souborem strojů, jako jsou drtiče, třídiče, vodní či větrné separátory, kalové hospodářství atd. Celkové uspořádání stacionárního recyklátoru musí být voleno tak, aby bylo variabilní a bylo schopné se přizpůsobit okamžitým odlišnostem v požadavcích na výrobu konečného recyklátu. Pro výrobu kvalitního recyklátu potřebujeme kvalitní přijímaný stavební a demoliční odpad. Stavební suť je přijata recyklační linkou a v jejím prostoru je roztríděna a odděleně skladována podle druhu. Doporučuje se vytvářet zásoby stavebního a demoličního odpadu, který je určen pro následující recyklaci, ve větším množství, ku příkladu 2 až 10 tisíc tun.

Stacionární linky mají dva stupně systému drcení stavební sutě. V prvním stupni je primární drtič, nejčastěji čelist'ový. Úkolem čelist'ového drtiče je provést předdrcení velkých kusů materiálu. Po předdrcení materiálu přichází na řadu odlučovač železa, který nám s vysokou účinností odděluje všechno železo z materiálu. Nedostatkem tohoto průběhu je fakt, že se nám nepodaří po prvním předdrcení v odlučovači železa dokonale odpojit beton od ocelové výztuže. Po odloučení kovu od betonu v odlučovači železa prochází suť do vibračního drtiče, kde dochází k odhlinění materiálu. Zbavíme se tedy materiálu, který není již konstrukčně vhodný. Poté dochází k druhému stupni drcení v sekundárním odrazovém drtiči, z této fáze již dostáváme kvalitní recyklát, ovšem s velkou ostrohranností a vysokou pevností. Pomocí pásového dopravníku se tento recyklát přesune opět do magnetického separátoru, který odloučí z recyklátu zbytky železa. Dále materiál pokračuje do vodního separátoru, kde dochází k odloučení prachových částic a k oddělení nežádoucích příměsí, které mají zpravidla nižší specifickou hmotnost. Z vodního separátoru nám tedy vycházejí tři materiálové toky. Nejdůležitějším z nich je tok praného vysoce kvalitního granulátu, další tok tvoří nežádoucí příměsí (dřevo, plast) a tokem posledním je voda s odloučenými částicemi prachu a drobných částic. Výstup stacionární recyklační linky tvoří vibrační třídiče, které vzniklý granulát třídí podle jednotlivých frakcí, odtud betonový recyklát putuje pomocí pásových dopravníků na místo uskladnění. [21]



Obr. 12: Stacionární recyklační linka [22]

3.5.2. Semimobilní recyklační linky

Tyto recyklační linky při práci stojí na místě, ale je možné je i přesouvat. Linky dělíme na lyžinové, kontejnerové a linky umístěné na kolovém podvozku. Souprava má z důvodu velké výšky násypné jímky šikmý podavač, který plní hlavní jímku soupravy. V případě semimobilní recyklační linky je použit jako hlavní stroj celé soustavy čelistový nebo odrazový drtič. Čelistové drtiče jsou vhodné v případě drcení měkkých a středně tvrdých hornin. Odrazové drtiče jsou vhodné pro drcení měkkého až tvrdého materiálu a nehrozí zacpání drtiče měkkými zrny narozdíl od drtiče čelistového. Dalším důležitým aspektem semimobilní recyklační linky je velikost ústí drtiče a také světlost otvoru, kterým daný materiál prochází do drtiče. Výkon drtiče je daný množstvím podrceného materiálu za hodinu, u běžných drtičů se výkon pohybuje v rozmezí 70-250 t/h mnohdy i více. Semimobilní linka dále zahrnuje vibrační podavače, třídiče, magnetické separátory a dopravníky. [23]



Obr. 13: Semimobilní recyklační linka [22]

3.5.3. Mobilní recyklační linky

Mobilní recyklační linky lze označit i jako mobilní drtírny a třídírny. Z pohledu mobility je důležitý druh podvozku mobilní recyklační linky. Mobilní podvozek je tvořen pásem, kolovým podvozkem, automobilovým podvozkem nebo pevným kontejnerovým rámem umístěným na lyžinách. Prvním zástupcem mobilních recyklačních linek je souprava na automobilovém podvozkem, tato souprava má čelistový drtič s vlastním pohonem a přijímací zásobník o objemu 1,5 m³. Dalším zástupcem je vlečná souprava o malém výkonu, která je tvořená drtičem a válcovým třídícím, který třídí materiál až na 5 frakcí. Mobilní návěsné soupravy na kolovém podvozkem jsou nejvíce používanými zástupci mobilních recyklačních linek. Jsou tvořeny kolovým podvozkem a drtičem. Násypku plníme lomovým kamenem, kdy větší frakce postupují do drtiče, zatímco frakce menší se přes roštový třídící dostávají rovnou na dopravní pás. Mobilní soustava na samohybných pásových podvozcích se používá pro zpracování odpadů z místních zdrojů. Pokud u mobilní linky zvolíme sofistikované uspořádání lze kvalita výsledného recyklátu srovnávat s recyklátem ze stacionární recyklační linky. [23] [24]



Obr. 14: Mobilní recyklační linka [22]

4. Betonový recyklát

Betonový recyklát lze charakterizovat jako sypaninu, která vzniká procesem drcení betonového odpadního materiálu po vypršení jeho životnosti. Betonovým odpadním materiálem mohou být nosné betonové konstrukce, podkladní betony, betony vysokopevnostní jako například vyřazené železniční betonové pražce. Výsledný charakter betonového recyklátu významně ovlivňuje kvalita původní betonové konstrukce (ovlivnění hlavně z hlediska obsahu cementové složky). Po drcení vzniká směsný betonový recyklát, který se skládá z různých frakcí. [25]

Recyklací starého betonu vznikne velké množství frakce 0-4 mm. Tato frakce recyklátu je tvořena převážně cementovým tmelem a je více pórovitá, nasákavá a tyto vlastnosti se odráží i v pevnosti výsledného materiálu, která je nižší. Kvůli vyšší nasákavosti materiálu je potřeba zvýšit objem cementu, což ovšem vede ke snížení zpracovatelnosti betonu. Z tohoto důvodu se do betonu přidává kromě recyklátů i přírodní kamenivo pro dosažení potřebných hodnot u vybraných vlastností. Recyklované kamenivo má horší vlastnosti oproti přírodnímu kamenivu. [14]

4.1. Legislativa a požadavky

Kamenivo do betonu se v současnosti dělí dle původu a dle objemové hmotnosti. Dle původu dělíme kamenivo na přírodní, umělé, regenerované a recyklované a dle objemové hmotnosti na pórovité, hutné a těžké. [26]

Dělení kameniva podle původu	
přírodní	kamenivo anorganického původu vystavené pouze mechanickému procesu
umělé	kamenivo anorganického původu, vystavené průmyslovému procesu, zahrnující tepelnou či jinou úpravu
regenerované	kamenivo vzniklé rozplavením čerstvého nebo rozdrcením ztvrdlého betonu, který nebyl dosud použit v konstrukci
recyklované	kamenivo vzniklé úpravou anorganického materiálu dříve použitého v konstrukci
Dělení kameniva podle objemové hmotnosti (po vysušení)	
pórovité	objemová hmotnost $\leq 2\,000\text{ kg/m}^3$
hutné	$2\,000\text{ kg/m}^3 < \text{objemová hmotnost} < 3\,000\text{ kg/m}^3$
těžké	objemová hmotnost $\geq 3\,000\text{ kg/m}^3$

Obr. 15: Rozdělení kameniva dle ČSN EN 206+A1 [27]

Použití recyklovaného kameniva do betonu není novým pojmem, v normě ČSN 72 1510 z roku 1987 se v definici drceného kameniva uvádí, že lze podrtit jak přírodní kámen tak jiný vhodný anorganický materiál, při čemž dochází k vytvoření vhodného kameniva do betonu. Dále se pojem recyklované kamenivo objevuje i v normě ČSN EN 206-1 z roku 2001, kde je tento pojem krajně zahrnut v definici kameniva. Oficiálně je recyklované kamenivo zahrnuto do normy ČSN EN 206 z roku 2014, kde je toto kamenivo definováno jako „*kamenivo získané při úpravě anorganického materiálu dříve použitého v konstrukci*“. Dále v normě ČSN EN 12620 + A1 Kamenivo do betonu, která zahrnuje kamenivo s objemovou hmotností nad 2000 kg/m^3 , je s upozorněním uvedeno i možnost použití recyklovaného kameniva s objemovou hmotností $1500 - 2000 \text{ kg/m}^3$. Dále norma uvádí, že jakékoliv kamenivo použité v konstrukci musí vyhovovat všem požadavkům této normy.

Recyklované kamenivo se do betonu podle legislativy přidává v menším objemu, tato skutečnost je dána nedostatečnými znalostmi přenosu vlastností recyklovaného kameniva do výsledného betonu, dále zpracovateli materiálu, kteří doposud nenabízejí vhodný produkt odpovídající podmínkám ČSN EN 12620 + A1 a posledním důvodem je stálá dostupnost přírodního kameniva. Podíly, kterými může recyklované kamenivo zastoupit kamenivo přírodní, jsou popsány v normě ČSN EN 206-1. Recyklovaného kameniva typu A i B můžeme do betonu pro stupeň prostředí X0 použít maximálně 50 % (hmotnosti). Pro stupeň XC1 a XC2 je možno použít pouze 30 % recyklovaného kameniva typu A a 20 % typu B. Pro XC3, XC4, XF1, XA1 a XD1 je možné použít pouze typ A a pouze 30 %. Pro všechny ostatní stupně vlivu prostředí není již doporučeno používat recyklované kamenivo. Recyklované kamenivo typu A musí obsahovat alespoň 90 % betonového recyklátu a méně než 10 % nečistot. Typ B je tvořen minimálně 95 % recyklátu, který je obsahuje minimálně 50 % betonového recyklátu a 45 % recyklátem tvořeným z kameniv, která jsou stmelena hydraulickými pojivy či nestmelená nebo pouze z přírodních kameniv. Pokud v betonu recyklované kamenivo zaujímá 100 % přebírá funkci výplně betonu a následné pevnosti a vlastnosti betonu se přesunou na cementový tmel a kontaktní zónu. Recyklované kamenivo ve 100% zastoupení bude do výsledného betonu přenášet vlastnosti matečního materiálu, jak mechanické tak i chemické. [27]

Tab. 3: Maximální procento nahrazení hrubého kameniva [26]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Všechny ostatní stupně
Typ A: (Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋)	50 %	30 %	30 %	0 %
Typ B: (Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋)	50 %	20 %	0 %	0 %
pozn. Recyklované kamenivo druhu A ze známého zdroje se může použít pro stupně prostředí, pro které byl navržen původní beton, s maximálně 30 %-ním nahrazením. Recyklované kamenivo druhu B se nepoužívá do betonu třídy pevnosti v tlaku >C 30/37.				

Tab. 4: Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo podle EN 12620 [26]

Vlastnost ⁱ	Článek v EN 12620:2002 + A1:2008	Druh	Kategorie dle EN 12620
Obsah jemných částic	4.6	A+B	Kategorie nebo deklarovaná hodnota
Index plochosti	4.4	A+B	$\leq Fl_{50}$ nebo $\leq Sl_{55}$
Odolnost proti drcení	5.2	A+B	$\leq LA_{50}$ nebo $\leq SZ_{32}$
Objemová hmotnost vysušených zrn ρ_{rd}	5.5	A	$\geq 2100 \text{ kg/m}^3$
		B	$\geq 1700 \text{ kg/m}^4$
Nasákavost zrn	5.5	A+B	Hodnota musí být určena
Složky	5.8	A	Rc ₉₀ , Rcu ₉₅ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋
		B	Rc ₅₀ , Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₅₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋
Sírany rozpustné ve vodě	6.3.3	A+B	$\leq SS_{0,2}$
Obsah ve vodě rozpustných chloridových iontů	6.2	A+B	Hodnota musí být určena
Vliv na začátek tuhnutí	6.4.1	A+B	$\leq A_{40}$
^a Kategorie NR (bez požadavků) se může použít pro jiné vlastnosti, neuvedené v této tabulce. Pro ně může být kategorie NR deklarována dle EN 12620 ^b Pro speciální aplikace vyžadující vysokou kvalitu povrchů, by měla být složka FL omezena na FL _{0,2}			

Dále je v ČSN P 73 2404 definován obsah jemných částic v recyklovaném kamenivu, jehož hodnota musí být menší než 15 %. Obsah humusu se v recyklátu může objevit maximálně v 1 %. Další definovanou vlastností je objemová stálost, kdy smršťování při vysychání musí být menší než 0,075 %.

Tab. 5: Přípustný obsah hmot v jednotlivých typech recyklátu [28]

Druh hmoty	Obsah hmot v hmotnostních procentech v jednotlivých typech recyklátu	
	Typ 1 drť nebo písek vyrobený drcením pouze betonu (betonová drť)	Typ 2 drť nebo písek vyrobený drcením stavební sutě
Beton a kamenivo podle ČSN EN 12620	≥ 90	≥ 70
Slinutá keramika, nikoliv porézni cihelný střep	≤ 10	≤ 30
Vápencový pískovec		
Ostatní minerální podíly ^{a)}	≤ 2	≤ 3
Asfalt	≤ 1	≤ 1
Ostatní příměsi ^{b)}	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$
^a Ostatní minerální podíly jsou například: porézni cihelný střep, lehký beton, pórobeton, mezerovitý beton, štuk, malta, porézni struska nebo škvára, pemza. ^b Ostatní příměsi jsou například: sklo, keramika, struska z neželezných kovů, štuková sádra, guma, plasty, kovy, dřevo, rostlinné zbytky, papír.		

Tab. 6: Nasákavost a objemová hmotnost recyklátu po 10 minutách [28]

Objemová hmotnost a nasákavost	Recyklát	
	Typ 1	Typ 2
Minimální objemová hmotnost [kg/m ³]	2 000	
Povolená tolerance objemové hmotnosti [kg/m ³]	± 150	
Maximální nasákavost po 10 minutách, hmotnostní podíl [%]	10	15

Česká legislativa v oblasti recyklovaného kameniva zatím vychází především z evropské normy EN 206-1 a 12620+A1, ovšem konkrétní český legislativní předpis pro využití betonového recyklátu i do konstrukčních prvků budov doposud nebyl vytvořen. Východiskem pro vytvoření dané legislativy by mohli být ostatní evropské země, které se zabývají recyklovaným kamenivem déle a intenzivněji. Příkladem těchto zemí je například Dánsko, Německo a Belgie.

V Německu došlo k úpravě tabulky z EN 206 ohledně maximálního množství použitého recyklátu v daném stupni prostředí.

Tab. 7: Maximální procento nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným [29]

Druh recyklovaného kameniva	Stupně vlivu prostředí		
	W0, XC1, WF, XC1-XC4	WF, XF1, XF3	WF, XA1
Typ 1: (Rc ₉₀ , Rb ₁₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₁₋)	45 %	35 %	25 %
Typ 2: (Rcu ₇₀ , Rb ₃₀₋ , Ra ₁₋ , FL ₂₋ , XRg ₂₋)	35 %	25 %	25 %

Tyto hodnoty jsou zaznamenány v německém kodexu praxe s označením DAfStb Guideline a jsou určeny pro recyklované kamenivo frakce větší než 2 mm a pro použití do betonů s maximální pevnostní třídou C 30/37. Další legislativní předpisy ohledně přípustného množství hmot, objemové hmotnosti a nasákavosti kameniva se shodují s výše uvedenými tabulkami 5 a 6. [29]

Dánská legislativa v případě nahrazení přírodního kameniva recyklovaným kamenivem podle vlivů prostředí vychází z evropské normy EN 206 a je neměnná, tedy stejná jako výše zmíněná tabulka 3. Tyto předpisy jsou platné pro recyklované kamenivo frakce vyšší než 4 mm a pro betony maximální pevnostní třídy C 30/37. [30]

V Holandsku tvoří legislativní opatření státní norma, která upravuje předpisy pro recyklovaný betonový agregát jako kamenivo pro výrobu prostého, železobetonového a předpjatého betonu. Kdy tato norma platí v případě, že je betonový recyklát ve směsi zastoupen z více jak 20 %. Pokud je recyklované kamenivo (jak jemné, tak hrubé) zastoupeno v množství do 20 % standardizace neplatí a recyklované kamenivo je bráno jako kamenivo přírodní. [31]

Tab. 8: Srovnání přípustného obsahu nečistot v betonových recyklátech i v jiných evropských zemích [31]

Druh hmoty	Belgie	Nizozemí
	Typ 1 drt' nebo písek vyrobený drcením pouze betonu (betonová drt')	Typ 1 drt' nebo písek vyrobený drcením pouze betonu (betonová drt')
Beton a kamenivo	≥ 90	≥ 95
Slinutá keramika, nikoliv porézni cihelny střep	≤ 10	≤ 5
Organické materiály	$\leq 0,5$	$\leq 0,1$
Asfalt	0	0
Nečistoty	$\leq 0,5$	≤ 1

Oproti České republice je v Belgii a Nizozemí nulová tolerance přítomného asfaltu v recyklovaném kamenivu. Je přísnější i maximální možná tolerance organických látek v materiálu, ale co se týče nečistot jako takových je jejich možná hodnota obsahu vyšší.

4.2. Vlastnosti

Vlastnosti betonového recyklátu jsou velice důležité, z hlediska konečného výsledku vlastností betonu, z něj vyrobeného. Pomocí zjištěných vlastností recyklátů upravujeme návrh betonové směsi. Zkoušky kameniva přírodního i recyklovaného jsou popsány v normě ČSN EN 12620+A1 Kamenivo do betonu. Požadavky na recyklované kamenivo ovšem upravuje i evropská legislativa a mimo ní v jednotlivých státech vznikají normy, které se zaměřují na dané potřeby jednotlivých regionů především z důvodu odlišných vlastností recyklátu, v návaznosti na různé stavební, demoliční i recyklační postupy. [32]

Tab. 9: Požadavky na vlastnosti recyklátu v různých státech [32]

Vlastnosti	Belgie	Německo	Nizozemí	Portugalsko	Česká republika
Složení [% hmotnosti]	≥ 95 % drceného betonu	≥ 90 % drceného betonu	≥ 95 % drceného betonu	≥ 90 % drceného betonu	≥ 90 % drceného betonu
Objemová hmotnost [kg/m ³]	≥ 2200	≥ 2000	≥ 2000	≥ 2200	≥ 2000
Nasákavost [%]	$\leq 10 \pm 2$	≤ 10	–	≤ 7	≤ 10
Obsah jemných částic [%]	1,5	–	1	4	–

4.2.1. Faktory ovlivňující vlastnosti recyklátu

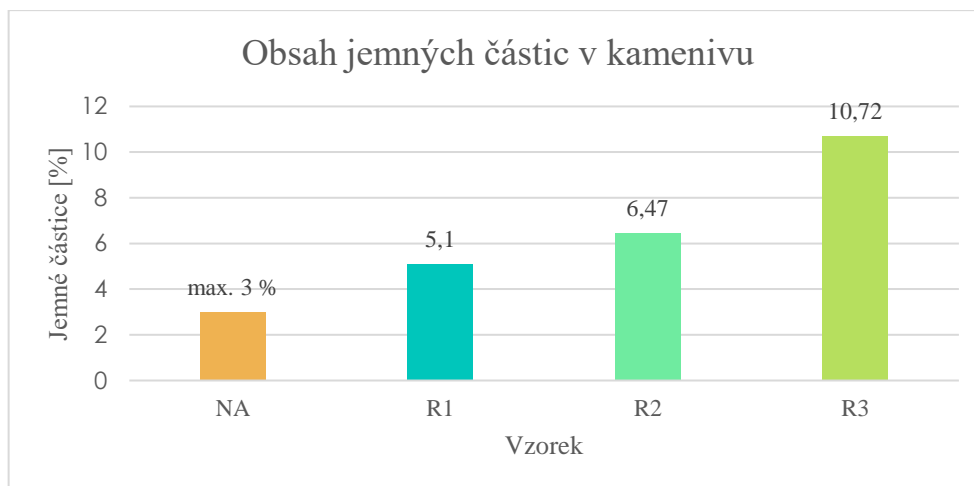
Výsledné vlastnosti betonového recyklátu jsou ovlivněné několika faktory, především původem a vlastnostmi matečního betonu. Prvním faktorem je pevnostní třída matečního betonu, jejíž dohledání není vždy možné. V případě, že zjistíme pevnostní třídu matečního betonu, je možné předem odhadnout budoucí vlastnosti recyklátu. Pevnostní třída nám ovlivňuje tvarový index a odolnost proti drcení. Pokud má beton vyšší třídu pevnosti, lze předpokládat, že výsledný recyklát bude mít hutnou strukturu a nižší pórovitost. Nevýhodou recyklátů vzniklých z betonů vyšších pevností je možný nesprávný tvarový index, kdy v návaznosti na hutnost, vyšší pevnost a křehkost betonu vznikají po drcení recykláty v podobě ostrohranných zrn. V případě matečního betonu s nižší pevností vzniká naopak při drcení velké množství drobné frakce recyklátu, který má zároveň menší pevnost a odolnost proti drcení i namáhání. Dalším faktorem je velikost maximálního zrna v matečním betonu. Pokud recyklát pochází z betonu, jehož pevnost je průměrná a maximální velikost zrna je 8 mm lze očekávat jeho vyšší tendence k nasákání. Pokud mateční beton obsahuje kamenivo vyšší frakce, výsledný recyklát má vyšší pevnost a snižuje se nasákavost a tendence k drolení. Množství přísad a příměsí v matečním betonu jsou dalším faktorem ovlivňujícím vlastnosti recyklátu. Mezi základní přísady, běžně používané ve stavební praxi patří plastifikátory a provzdušňovací přísady, které ovlivňují zpracovatelnost betonu, redukují množství záměsové vody a množství pórů. Provzdušňující přísada v recyklátu ovlivňuje nasákavost a pevnost zrn. Betonový recyklát může být do betonu jako náhrada za přírodní kamenivo použit pouze v případě, že obsahuje více než 90 % betonu a méně než 10 % jiných materiálů nebo nečistot. Dalším faktorem jsou tedy nečistoty, mezi které řadíme keramický střep, dřevo, plast, sádku, sklo nebo asfalt. Keramický střep jako nečistota v betonovém recyklátu nemá škodlivé účinky, zatímco ostatní zmíněné nečistoty mohou výrazně ovlivnit kvalitu recyklátu i výsledného betonu. Recyklát obsahující humusové částice, nemůže být použit pro výrobu betonu, z důvodu bránění spojení zrna s cementovou matricí a bobtnání po styku s vodou, které může zapříčinit narušení struktury betonu. Velice důležitým faktorem je původ matečního betonu, nejlepším případem je situace, kdy je recyklát tvořen čistým betonem z jednoho zdroje. Tento typ recyklátu vzniká při demolici betonové vozovky či při drcení zmetků vzniklých při prefabrikované výrobě. U těchto recyklátů je snazší odhadovat jejich budoucí vlastnosti i ovlivnění vlastností výsledných betonů. Pokud je stavební odpad

čerpán z více zdrojů nebo je vytvořen demolicí větší stavby dochází ke zvýšenému znečištění. Více zdrojů i větší množství stavebního odpadu má negativní dopad hlavně na drobné frakce recyklátu, kde může vznikat více jemných částic. V případě hrubého recyklátu nečistoty a četnost zdrojů snižují odolnost proti drcení. Dalšími faktory jsou nasákavost kameniva v matečním betonu, dále jeho původ, tedy jestli se jedná o kamenivo lomové či těžené, druh použitého cementu. Dále je nutné se zaměřit na modifikace betonu v průběhu životnosti, beton ovlivňuje karbonatace, rozmrazovací látky, či přítomnost plísní. Tyto faktory nebereme v potaz v případě, že je beton zabudován v konstrukci. [33]

Následující grafická znázornění vyjadřují odlišnosti ve vlastnostech betonového recyklátu s ohledem na jejich původ. Prvním zkoumaným recyklátem je betonový recyklát vytvořený ze zmetků prefabrikované výroby. Vzorek obsahuje minimum nečistot, původní beton byl řazen do pevnostní třídy C 40/50 a jeho maximální zrno kameniva mělo 8 mm. Tento zkoušený recyklát je označen jako R1. Druhý zkušební vzorek tvořil recyklát vytvořený opět ze zmetků prefabrikované výroby, ovšem v tomto případě se jednalo o prefabrikovanou výrobu stropních panelů s názvem SPIROLL. Vzorek neobsahoval nečistoty z důvodu uchování recyklátu pro laboratorní výzkum. Původní beton spadá do pevnostní třídy C 45/55 a maximální zrno kameniva mělo velikost 16 mm. Vzorek má označení R2. Posledním zkoumaným vzorkem recyklátu byl vzorek získaný z demolice, přesněji se jednalo o demolici cementového krytu vozovky. Recyklát byl lehce znečištěn malým podílem dřeva a zeminy. Původní pevnost cementového krytu byla C 45/55 a maximální zrno kameniva bylo ve velikosti 22 mm. Vzorek má označení R3. Všechny tyto vzorky byly srovnány s referenčním vzorkem přírodního kameniva dále označovaného jako NA (natural aggregate). [33]

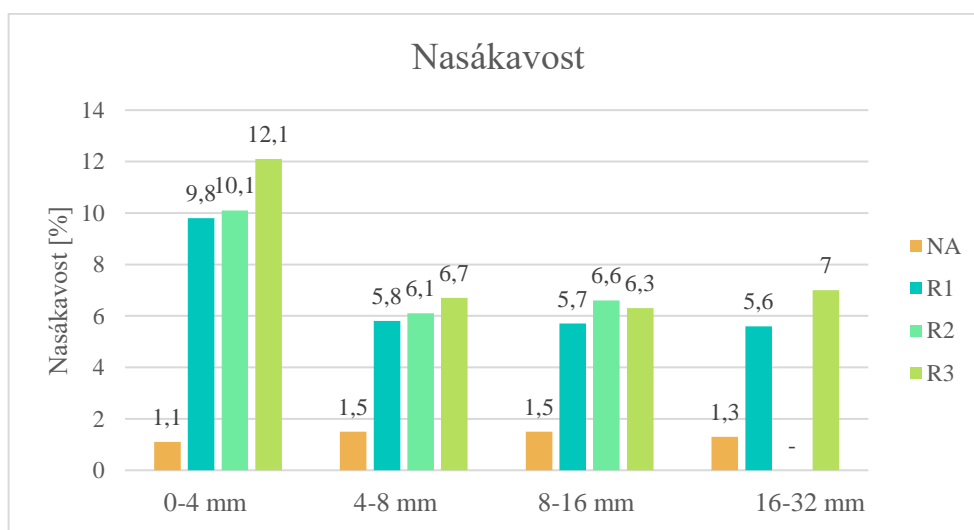
Tab. 10: Zkoušené vzorky betonových recyklátů [33]

Kamenivo	Původ	Pevnostní třída matečního materiálu	Maximální zrno v matečním materiálu	Frakce
R1	Prefabrikovaná výroba	C 40/50	8 mm	0-20 mm 16-32mm
R2	Prefabrikovaná výroba	C 45/55	16 mm	0-4 mm 4-8 mm 8-16 mm
R3	Demolice	C 30/37	22 mm	0-32 mm



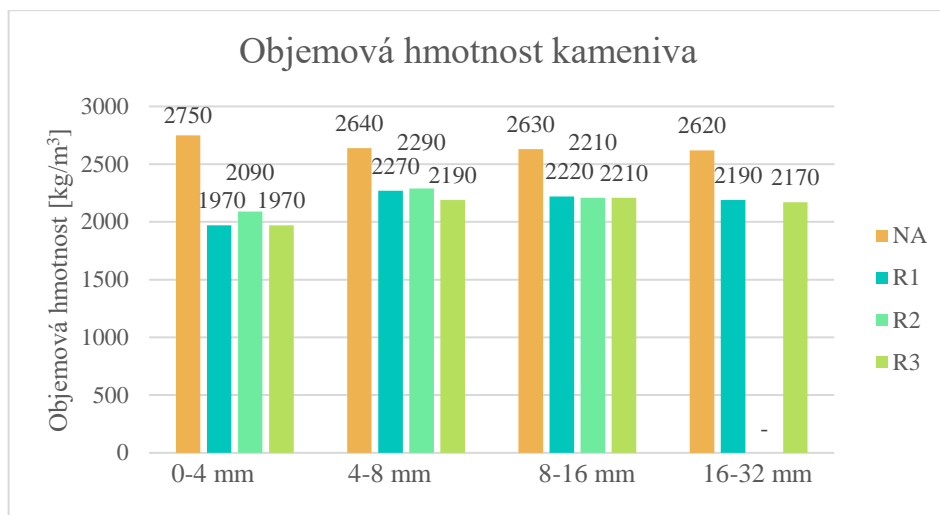
Graf 2: Obsah jemných částic v betonovém recyklovaném kamenivu [33]

Obsah jemných částic kameniva je výsledný podíl kameniva, které propadne při síťovém rozboru sítem 0,063 mm. Výsledky obsahu těchto částic v recyklovaném kamenivu jsou vyšší než u přírodního kameniva, ale obecně by se jejich obsah měl snižovat s narůstající pevností matečného betonu. U vzorku R3 došlo mimo jiné k provzdušnění původního materiálu, které způsobilo větší podíl obsahu jemných částic.



Graf 3: Nasákavost betonového recyklovaného kameniva [33]

Nasákavost betonového recyklátu je dle předpokladu mnohem vyšší než u kameniva přírodního. Ovšem mezi samotnými vzorky není již takový procentuální skok. Pouze v případě vzorku R3 došlo k vyšší nasákavosti kameniva frakce 0-4 mm z důvodu provzdušnění matečního betonu. Mírné odchylky výsledků zkoumaných vzorků poukazují na minimální vliv původu recyklovaného kameniva na jeho nasákavost



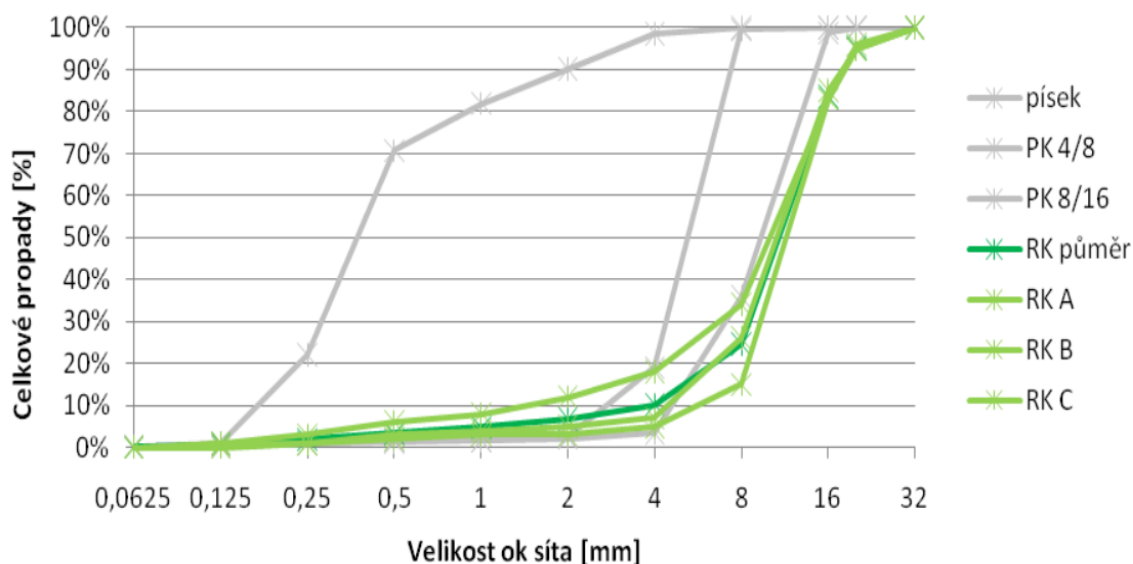
Graf 4: Objemová hmotnost kameniva ve vysušeném stavu [33]

Výsledky objemové hmotnosti vysušeného recyklovaného kameniva vychází v průměru kolem hodnoty 2000 kg/m^3 což je limitní hodnota pro recyklované kamenivo dle české legislativy a oproti objemové hmotnosti přírodního kameniva je podstatně nižší.

4.2.2. Geometrické vlastnosti recyklovaného kameniva

Jednou ze základních zkoušek pro zjištění geometrických vlastností betonových recyklátů je síťový rozbor. Pomocí tohoto testu je možné zjistit podíly jednotlivých frakcí kameniva a objem jemných částic. Výstupem této zkoušky je čára zrnitosti kameniva. Z výsledků je následně možno vypočítat podíly jednotlivých frakcí. Obsah jemných částic kameniva se vypočítá jako poměr hmotností kameniva, které propadne všemi sítí a celkové hmotnosti vzorku. Dále je možné stanovit modul jemnosti, který se stanoví za použití sady šesti sítí o velikosti 0,125 – 0,25 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 mm jako součet propadů sítí. Čáry zrnitosti mají podobný průběh u recyklovaného i přírodního kameniva. V recyklovaném kamenivu je vyšší podíl hrubé frakce. [32] [34]

V grafu níže je zaznamenáno porovnání křivek zrnitosti přírodního a recyklovaného kameniva. Přírodní kamenivo bylo použito ve frakci 0-4 mm, 4-8 mm a 8-16 mm. Betonový recyklát označen zkratkou RK A,B, C byl pro zkoušku zrnitosti použit v jednotné frakci a to 0-22 mm. Na zobrazených křivkách zrnitosti je viditelná podobnost recyklovaného kameniva ku kamenivu přírodnímu frakce 8-16 mm, tato podobnost křivek je dána obsahem hrubé složky v recyklovaném kamenivu. Obsah hrubější frakce v recyklovaném kamenivu má kladný dopad na jeho další vlastnosti. [32]



Obr. 16: Porovnání čar zrnitosti přírodního a recyklovaného kameniva [32]

4.2.3. Fyzikální vlastnosti recyklovaného kameniva

Základními fyzikálními vlastnostmi betonového recyklátu jsou objemová hmotnost, nasákavost, odolnost proti drcení. V normě je kromě popisů zkoušek uvedena i četnost provádění těchto zkoušek, kdy v porovnání s přírodním kamenivem se dělají zkoušky recyklátu častěji. [34]

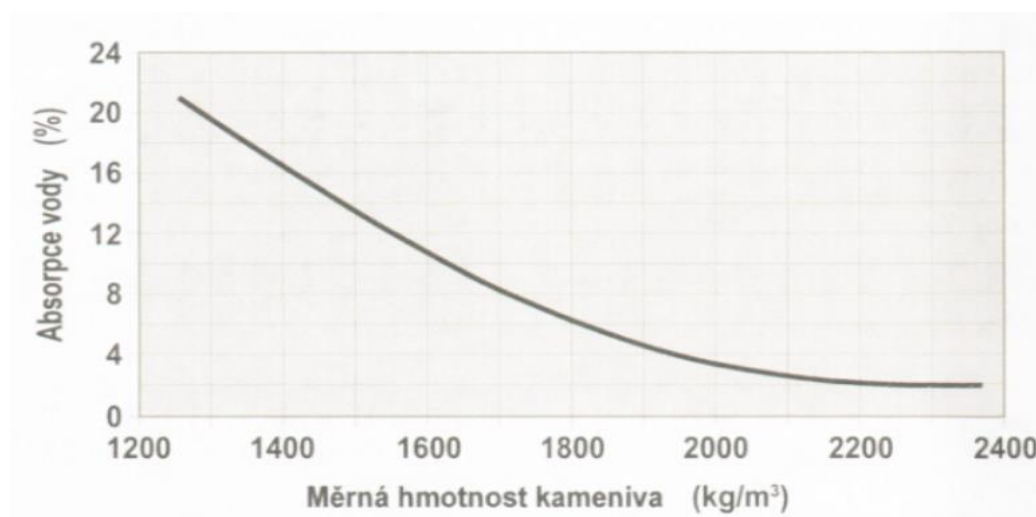
Objemová hmotnost se stanovuje pomocí pyknometrické metody. Tato metoda lze provést v plně nasyceném stavu i stavu dokonale suchém. Pro zkoušku provedenou v plně nasyceném stavu je potřeba kamenivo během 24 hodin plně nasytit vodou, v případech některých vzorků, je potřeba kamenivo namáčet déle. Zkouška v dokonale suchém stavu probíhá na vzorcích vysušených v sušárně při teplotě 100 ± 5 °C. Objemová hmotnost recyklovaného kameniva dosahuje nižších hodnot, než objemová hmotnost kameniva přírodního. Z již provedených výzkumů vyplývá, že se hodnota objemové hmotnosti recyklovaného kameniva snižuje v suchém stavu i nasyceném stavu zhruba o 10-15 %. Objemová hmotnost recyklátu se mění také s charakterem samotného recyklátu, v případě recyklátu vyrobeného laboratorně dosahuje hodnota objemové hmotnosti vyšších hodnot než u recyklátů z recyklačního zařízení. Objemová hmotnost hrubého betonového recyklátu dosahuje hodnoty od 2300 kg/m^3 do 2500 kg/m^3 . Zatímco u přírodního hrubého kameniva se tato hodnota pohybuje kolem $2600 - 2700 \text{ kg/m}^3$. U drobného recyklátu, je hodnota objemové hmotnosti ještě nižší, a to konkrétně

2150 – 2350 kg/m³. Nižší hodnota je dána vysokým obsahem ztvrdlé cementové pasty, která má oproti přírodnímu kamenivu nižší objemovou hmotnost. [35] [36]

Tab. 11: Objemové hmotnosti přírodního a recyklovaného kameniva [35]

Kamenivo	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Recyklované hrubé	2300-2500
Recyklované jemné	2150-2350
Přírodní	2600-2700

Nasákavost recyklovaného kameniva se stanovuje taktéž pomocí pyknometrické metody. Výsledkem se pak stává poměr plně nasyceného a dokonale suchého vzorku. Recyklované kamenivo dosahuje hodnoty 4 až 9 % nasákavosti, což je mnohem vyšší hodnota než u kameniva přírodního (0,5 až 2,5 %) v případě frakce zrna 4 – 32 mm. Nasákavost drobné frakce recyklovaného kameniva dosahuje hodnoty až 12 %. Vyšších hodnot nasákavosti dosahuje recyklované kamenivo z důvodu vyšší pórovitosti, která je zapříčiněna cementovým tmelem vyskytujícím se na povrchu recyklátu. Dalšími příčinami vysoké hodnoty nasákání mohou být další druhy hmot, vyskytujících se v recyklátu, u nichž není znám původ, to samé platí i pro původní kamenivo obsažené v recyklátu. Nasákavost je obecně vyšší u nižších frakcí, proto dochází k upřednostňování hrubších frakcí. V případě nasákavosti kameniva dochází u recyklátů k největším propadům oproti kamenivu přírodnímu, a to i v případě recyklátů vyrobených laboratorně. Hodnoty se také liší v průřezu pouze vzorků recyklovaného kameniva, takže dochází k velkým rozdílům mezi vzorky. [35] [32]

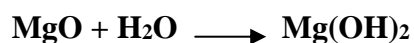


Obr. 17: Závislost měrné hmotnosti recyklovaného kameniva na absorpci vody [35]

Mezi objemovou hmotností a nasákavostí recyklovaného kameniva existuje závislost. Hodnota nasákavosti se zvyšuje se snižující se objemovou hmotností. Tato závislost je daná pórovitostí cementového tmele. Z důvodu vysoké nasákavosti recyklátu je prodloužena doba nasáknutí recyklovaného kameniva. Na tento fakt musíme pohlížet při míchání betonu a kamenivo nechat pořádně nasáknout, jinak dojde k úbytku vody potřebné k hydrataci cementu. Recyklované kamenivo se by tedy před vmícháním do betonové směsi mělo nechat dokonale nasáknout a poté nechat 2 – 3 hodiny odležet na suchu. [35]

4.2.4. Chemické vlastnosti recyklovaného kameniva

Jedním z hlavních problémů recyklovaného kameniva je odstranění kontaminujících látek. Existuje celá řada látek, které mohou výsledný recyklát kontaminovat, a proto je třeba je odstranit. Sádrovec je látka přítomná v omítkových maltách, proto se při demolici může stát, že sádrovec zůstane na recyklátu. Maximální povolený obsah síranů (sádrovec = síran vápenatý) pro přírodní kamenivo je 0,2 %. Tato hranice je definovaná zejména kvůli reakci síranů s kalciumalumináthydrátem (C-A-H) či s kalciumsilikáthydrátem (C-S-H) za vzniku ettringitu nebo thaumasitu. Při vzniku těchto minerálů dochází ke zvětšení objemu betonu a jeho porušení. Chloridy jsou v recyklovaném kamenivu přítomny v případě, že konstrukce, ze které pocházejí byla v kontaktu s rozmrazovacími solemi nebo s mořskou vodou. Chloridy díky dobré rozpustnosti, můžeme z recyklátu odstranit pouhým praním v horké vodě. Znečišťující látky v podobě papírů, dřeva, skla či hliníku nám mohou snížit pevnost výsledného betonu. Pokud tedy pracujeme s takto znečištěným recyklátem, může být použit pouze do betonů s nižší pevností, nebo do betonů podkladních. Pokud používáme recyklát z budov, kde byly použity žáruvzdorné cihly, můžeme narazit na problém v podobě MgO, které pak při smíchání s vodou vytváří hydroxid hořečnatý a dochází k velké expanzi, při které se opět naruší struktura betonu. Vzniká reakce popsaná níže. [35]



MgO – oxid hořečnatý

H₂O – voda

Mg(OH)₂ – Hydroxid hořečnatý

4.3. Využití

Betonový recyklát se do nedávné doby v naší zemi používal převážně pro tvorbu zásypů, jako podkladový materiál méně zatížených vozovek, pro úpravu plání železničních a silničních staveb a ve výjimečných případech pro výrobu nosných konstrukcí. Recykláty lze rozdělit do tří skupin, podle jejich použití. První skupinou jsou recyklované stavební prvky a směsi, které se mohou využít při výrobě nových konstrukcí. Do druhé skupiny spadá recyklovaná sypanina, kterou lze konstrukčně použít, ku příkladu na zemní tělesa. Třetí skupinu tvoří opět recyklovaná sypanina, ale s takovými vlastnostmi, které nevyhoví požadavkům předcházející skupiny. Tuto sypaninu můžeme použít na vytvoření zásypů rýh nebo nenosných zemních těles. V případě využití recyklovaného kameniva do nosných prvků je nutné, tomuto recyklátu věnovat zvýšenou pozornost a zaměřit se na jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti a také se zaměřit na jeho původní složení a na kvalitu provádění recyklace. Poté můžeme specifikovat požadavky pro přípravu betonové směsi a dále kontrolovat chování recyklátu ve stavebním prvku v čase. [37]

4.3.1. Využití recyklátů drobné zrnitosti

Při výrobě betonového recyklátu kromě hrubé frakce vzniká také velké množství drobného kameniva (frakce do 4 mm). Tato frakce recyklátu má oproti té hrubé (použitelné do betonu) zhoršené vlastnosti, tudíž se její použití do betonu nedoporučuje. Ovšem je to opět velké množství odpadu jehož plný potenciál ve výrobě nebyl dosud určen. V současnosti probíhá několik výzkumů zaměřujících se na využití této frakce z hlediska mechanické aktivace nehydratované části betonové pasty, která může posloužit pro výrobu nového materiálu. Aktivace je prováděna pomocí velmi jemného mletí recyklátu při kterém dochází k otevření zrn materiálu. Nehydratované zrno je tedy otevřeno a může být použito pro další hydratační procesy. Princip mechanické aktivace pomocí vysokorychlostního mletí spočívá v otevření nehydratovaných zrn betonové pasty. Množství těchto zrn je závislé na druhu recyklátu a také jeho stáří. Obecně se množství pohybuje okolo 10 % až 20 % z hmotnosti daného vzorku. Pokud dojde ke kvalitní aktivaci může být materiál použit jako náhrada části pojiva v další výrobě a jeho neaktivované (inertní) části přebírají funkci mikroplniva v novém materiálu. Ovšem tento výzkum se zaměřuje pouze na recyklované kamenivo frakce 0-2 mm. [38]

Další výzkum pro použití jemné frakce recyklovaného kameniva byl zaměřen na výrobu malt zejména pro nátěry stěn. Nejdůležitějšími vlastnostmi tvrzené malty pro obkládání stěn jsou: mechanická pevnost, modul pružnosti, propustnost pro vodu, pevnost lepidla, odolnost vůči povětrnostním vlivům a vlastnosti čerstvé malty jako jsou zpracovatelnost a retence vody. Ze studií vyplývá, že vlastnosti recyklátu a tím pádem i konečného produktu jsou vysoce ovlivněny jeho původem a zpracováním. Obecným výsledkem výzkumů a provedených testů je použití jemné frakce recyklovaného kameniva do 20 %. Tedy tak, aby nedošlo k výraznému zhoršení vlastností materiálu, ovšem opět záleží na vlastnostech recyklátu samotného. Pro udržení stejné konzistence čerstvé malty s přírodním kamenivem je potřeba s náhradou recyklovaným kamenivem přidat více vody, z důvodu vysoké pórovitosti recyklovaného kameniva. Objemová hmotnost čerstvé malty pak klesá s vyšším obsahem náhrady recyklovaného kameniva. Pevnosti v tlaku i tahu a modul pružnosti se zvyšují oproti referenčním maltám, ale dochází k poklesu adhezní pevnosti k podkladu (až o 20 %) a nárůstu smrštění malty. [39]

4.3.2. Využití recyklátů v České republice

V České republice není potenciál na recyklaci betonu zcela naplněn. V současné době probíhá rozsáhlý výzkum výroby vláknobetonů s přidavkem recyklovaného kameniva. Výsledky zkoušek potvrzují pozitivní vliv přidaných vláken na vlastnosti betonu s recyklátem. S navyšujícím se objemem vláken snížíme objemovou hmotnost a zvýšíme pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, modul pružnosti i pevnost v tahu ohybem. Konečný vláknobetonový kompozit je možné použít pro výrobu zemních konstrukcí. [14]

Rebetong je dílem společnosti SKANSKA spojený s know how společnosti Erc-Tech. V roce 2019 byl otevřen volnočasový areál v pražských Modřanech. Stavba byla vytvořena pávě z Rebetongu, čili betonu který je kompletně tvořen recyklovaným kamenivem. Beton má díky nanopříměsi obdobné vlastnosti jako beton s přírodním kamenivem i přes nižší objem cementu. V roce 2020 byl rebetong použit při výstavbě projektu Čertův vršek, kde slouží jako podkladní beton. Rebetong je možné použít pro pevnostní třídu C 12/15, X0 až C 25/30, XC4, XD2, XF1, S1-S4 a mezi jeho výhody patří nižší náklady na dopravu i materiálové náklady, úspora přírodních zdrojů kameniva a energie využitá na jejich těžbu a dopravu. [40] [41]



Obr. 18: Ukázka rebetongu s cihelným a betonovým recyklátem [42]

4.3.3. Využití recyklátů ve světě

4.3.3.1. Indie

V Indii se zabývali výzkumem nosníků při rázovém namáhání. Tyto nosníky byly tvořeny přírodním jemným kamenivem a betonovým recyklátem v různém procentuálním zastoupení místo hrubého kameniva. Tímto výzkumem bylo potvrzeno, že betonový recyklát je relativně jemný oproti hrubému kamenivu. Textura povrchu je více pórovitá a drsná. Tyto vlastnosti nám zapříčiní využití více vody pro zachování stejné úrovně zpracovatelnosti betonu. [14]

4.3.3.2. Čína

V Číně se zabývali výzkumem betonového recyklátu v betonu a následovnou úpravou Bolomeyovy rovnice pro výpočet pevnosti v tlaku. V rámci zkoušek byly vyrobeny dvě série vzorků, kdy v jednom případě beton obsahoval písek a hrubé recyklované kamenivo a ve druhém případě vzorek obsahoval pouze recyklát v různých frakcích. Úkolem bylo zjistit, jestli pro beton s recyklátem platí stejná lineární závislost v Bolomeyově rovnici jako u betonu s přírodním kamenivem. [14]

4.3.3.3. Brazílie

Při výzkumu v Brazílii nejdříve rozřídili stavební odpad podle pórovitosti a poté zjišťovali vliv na vlastnosti betonu. Hrubé frakce byly rozříděny do 4 kategorií podle pórovitosti. Směsi betonu se dávkou cementu pohybovali od 300 – 500 kg/m³, vodní

součinitel byl v rozmezí 0,4 – 0,67 a jemná frakce byla tvořena přírodním kamenivem. Hrubé kamenivo bylo z důvodu redukce vlivu nasákavosti předem navlhčeno. Do směsi byl přidán plastifikátor pro podpoření dobré zpracovatelnosti. Z výsledků měření bylo zjištěno, že pevnost v tlaku i modul pružnosti klesají se zvyšující se porozitou plniva. Použitím hrubého recyklátu do betonové směsi zvyšujeme spotřebu cementu pro docílení požadované pevnosti, které by beton docílil pouze s přírodním kamenivem. [14]

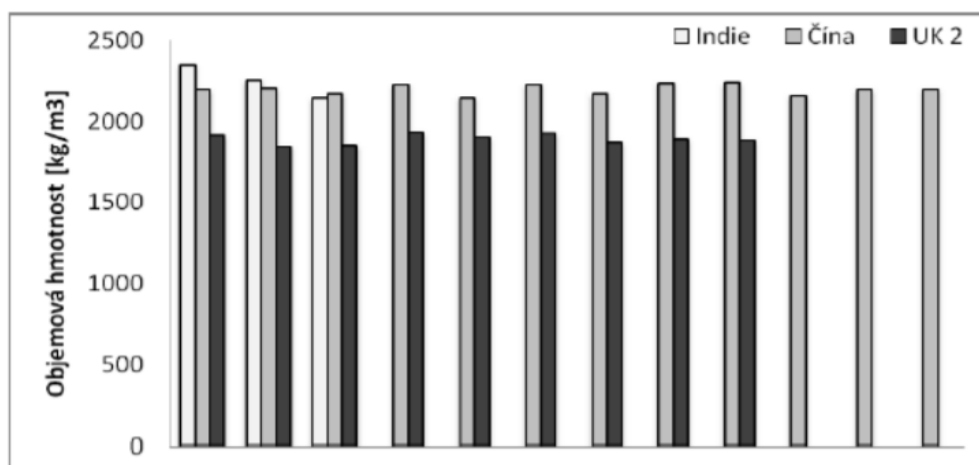
4.3.3.4. Velká Británie

V Birminghamu se kromě betonového recyklátu zaměřili i na použití recyklátu cihelného a vlivu jejich poměrného zastoupení ve směsi. Pro výzkum byly vyrobeny čtyři série vzorků s odlišnými podíly hrubé frakce recyklátů. Všechny vzorky měli jemnou frakci tvořenou přírodním kamenivem. Pro výzkum byly použity dva druhy recyklátů, prvním druhem byl recyklát vytvořený pomocí recyklační linky. Druhý druh recyklátu byl vyroben v laboratoři. Výsledkem měření bylo, že pevnost v tlaku betonu s betonovým recyklátem se vyrovnává pevnosti v tlaku betonu s přírodním kamenivem. Na základě výsledků výzkumu bylo potvrzeno, že cihelný recyklát má vyšší nasákavost. [14]

V Liverpoolu se výzkum zaměřil na použití demoliční sutě do prefabrikovaných bloků jako náhrada za vápencové plnivo. Tyto bloky se vyrábějí z poměrně suché směsi s malým obsahem cementu. V první fázi výzkumu byla v betonu nahrazena celá suma přírodního kameniva recykláty (betonovým i cihelným). Při této náhradě došlo k velkému snížení pevnosti v tlaku, proto musela být navýšena dávka cementu. Ve fázi druhé se výzkum odehrál v betonárně, kde se ukázalo, že s výrobou betonových prefabrikovaných prvků s recykláty není žádný výrazný problém. Dokonce při zvolení správného zastoupení frakcí recyklátů nebylo nutné do směsi přidávat cement, ale jeho objem byl ponechán na původní hodnotě. Tedy výsledný beton dosahoval výsledné požadované pevnosti 7 MPa a víc. [14]

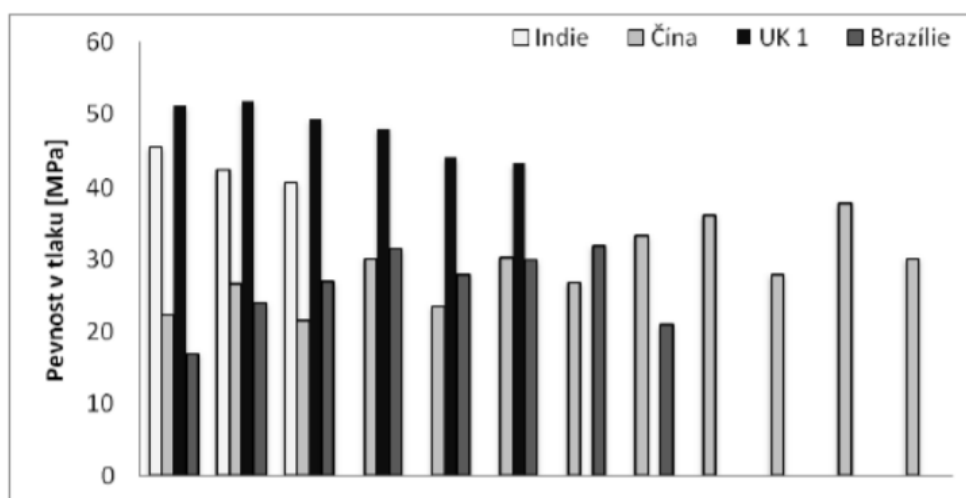
Tab. 12: Zkoušené množství cementu a vody [14]

Pracoviště	množství cementu [kg/m ³]	vodní součinitel
Indie	401	0,43
Čína	293-488	0,67
UK 1	435	0,47
UK 2	100-250	0,63-1,61
Brazílie	300-500	0,4-0,67



Obr. 19: Grafické znázornění objemových hmotností [14]

Objemová hmotnost vzorků vyrobených v Indii a Číně se pohybovala zhruba od 2000-2400 kg/m³, zatímco objemová pevnost betonu s přírodním kamenivem se běžně pohybuje mezi 2000-2500 kg/m³, tedy snížení objemové hmotnosti vlivem recyklátu je v těchto dvou případech malé. Zatímco hodnota objemové hmotnosti vzorků z Liverpoolu nepřesáhla hodnotu 2000 kg/m³ tedy rozdíl je znatelnější.



Obr. 20: Grafické znázornění pevností v tlaku [14]

Na pevnost betonu s recyklovaným kamenivem mělo velký vliv množství použitého cementu i vodní součinitel. Nejvyšších pevnostních hodnot dosahovali vzorku z Birminghamu a Indie. V těchto dvou vzorcích bylo použito přes 400 kg cementu na kubický metr a vodní součinitel se pohyboval pouze kolem hodnoty 0,45.

5. Konstrukční beton s betonovým recyklátem

Zhruba 30 % odpadů tvoří v České republice i zemích Evropské Unie stavební a demoliční odpad. Recyklací tohoto odpadu a následným použitím v betonu, jako náhrada části přírodního kameniva, dochází k šetrnému zacházení s přírodními zdroji i snižování velkého objemu demoličního odpadu. Z důvodu zhoršených vlastností recyklovaného kameniva oproti kamenivu přírodnímu dochází k negativnímu ovlivnění vlastností výsledného betonu. Zhoršují se jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti betonu. Snížení kvality betonu je ovlivněno původem recyklátu, jeho složením, samotným dějem recyklace a jeho výslednou úpravou. Při použití kvalitního recyklátu dochází ke zhoršení vlastností do 15 %, není tudíž tak rapidní. Tento beton se proto může použít v nejružnějších částech konstrukce, kde není kladen velký důraz na pevnost, ku příkladu mimo základovou desku. Problematika recyklovaných betonů je v České republice novým pojmem, proto problematika životnosti a trvanlivosti není zcela objasněna. Je proto potřeba se tímto tématem zabývat, aby bylo co nejdříve možné uvést recyklovaný beton do stavební praxe. [43]

5.1. Legislativa a požadavky

Dělení betonu z recyklovaného kameniva dle ČSN P 73 2404 je následující [28]:

RC: Beton z recyklovaného kameniva (Concrete from recycled aggregate RC) je cementový kompozit v němž je drobné i hrubé kamenivo zcela nahrazeno recyklovaným kamenivem, jehož dávka překračuje stanovené limity a objemová hmotnost RC je $\geq 1800 \text{ kg/m}^3$.

RC-C: Beton z betonového recyklovaného kameniva (Concrete from concrete recycled aggregate) cementový kompozit obsahuje více než 70 % betonového recyklátu.

RC-B: Beton z cihelného recyklovaného kameniva (concrete from brick recycled aggregate)

RC-M: Beton ze směsného recyklovaného kameniva (concrete from mixed recycled aggregate)

LCR: Lehký beton z recyklovaného kameniva (lightweight concrete from recycled aggregate)

Značení betonu s recyklovaným kamenivem dle ČSN P 73 2404 [28]

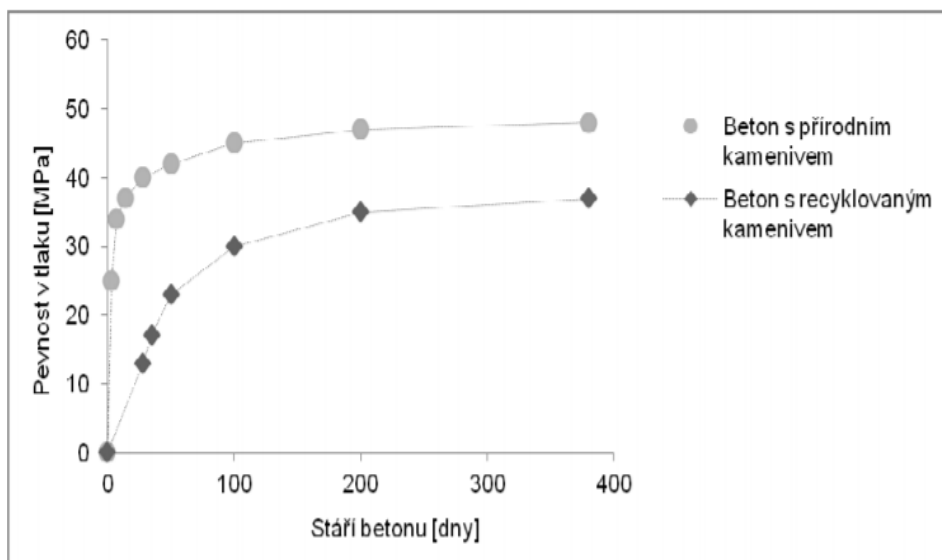
RC-C25/30 – XC2 – CI 0,40 – D_{max}22-S1

-Beton z betonového recyklovaného kameniva s pevnostní třídou C 25/30, v prostředí mokřím, občas suchém. Obsah chloridů je dán pro konstrukce s ocelovou výztuží, maximální zrno kameniva 22 mm a konzistence S1. [28]

5.2. Vlastnosti betonu

Pro vytvoření receptury betonu, musíme předpokládat vyšší nasákavost recyklovaného kameniva, proto musíme zvýšit množství záměsové vody alespoň o 5 % v případě použití pouze hrubé frakce, pokud použijeme drobnou frakci recyklátu musíme zvýšit objem vody na 15 %. Nebo je nutno tento problém vyřešit například plastifikátorem. [35]

Vlastnosti zatvrdlého betonu se s použitým recyklátem zhoršují. Hlavní vlastností betonu, jakožto konstrukčního materiálu je jeho **pevnost**, která je použitým recyklátem výrazně snížena. Pevnost betonu vykazuje zhruba 70 % své celkové hodnoty již po 28 dnech, po několika měsících je na 90 % z celkové pevnosti a dalších několik let se pevnost ustaluje. Pevnost v tlaku betonu s recyklátem je nižší až o 40 % dle kvality, frakce a množství použitého recyklátu. Ovšem nárůst pevnosti byl rychlejší než u betonu s kamenivem přírodním a to zhruba o 60 % v intervalu od 28 dní do 5 let. [43]

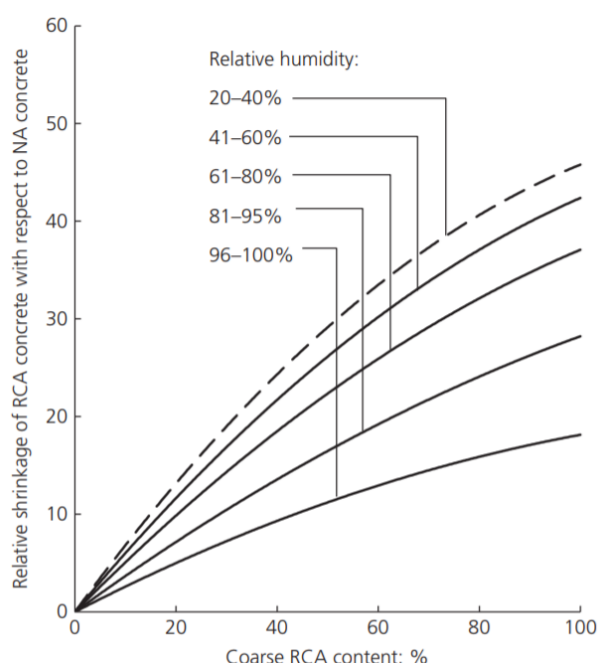


Obr. 21: Grafické porovnání pevnosti betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem [43]

Tab. 13: Doporučené množství recyklovaného kameniva v závislosti na charakteristickou pevnost [35]

Původ recyklátu	$f_{cu,ck}$ [MPa]	Obsah recyklovaného kameniva [%]
Stavební demolice	< 15	≤100
Demolice betonu	≤ 25	≤60
	≤ 35	≤30
Drcené prefabrikáty	≤ 55	≤5

Smrštění betonu je další důležitou vlastností konstrukčního materiálu. Je to jev, který vzniká při objemových změnách betonu. Při těchto objemových změnách dochází jak ke smrštění tak k vytvoření trhlin ve struktuře betonu, které negativně ovlivňují životnost a trvanlivost stavby. Princip smršťování je stejný v případě kameniva přírodního i recyklovaného. Liší se ovšem výsledné hodnoty celkového smrštění. U betonu s přírodním kamenivem je hodnota smrštění 0,45-0,7 mm/m po 60 dnech. Betony s recyklovaným betonem dosahují hodnoty až kolem 1,5 mm/m. Smrštění je ovlivněno vysokou nasákavostí recyklátu s vyšším objemem recyklátu v betonu roste i hodnota smrštění. [43]



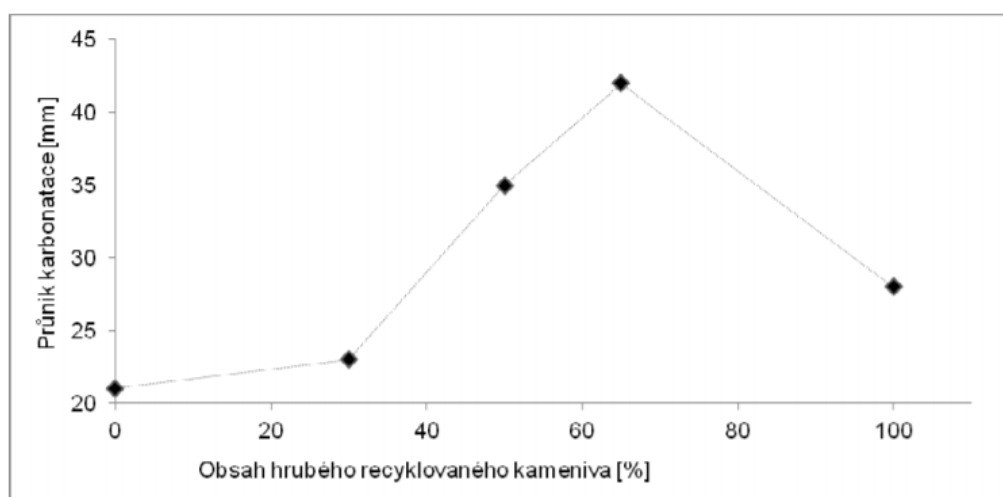
Obr. 22: Smrštění betonu s ohledem na procentuální zastoupení betonového recyklátu a relativní vlhkost [44]

Dotvarování je jev, kdy beton prochází trvalou změnou objemu, například vlivem dlouhodobého zatížení, které vyvolává v konstrukci betonu napětí a vytváří deformaci, která postupně narůstá. Princip dotvarování je opět podobný v případě betonu s přírodním i recyklovaným kamenivem. Ovšem přidáním betonového recyklátu do betonu se dotvarování zvyšuje. Příčinou tohoto jevu, je obsah cementového tmele v použitém recyklátu. Rozdíl dotvarování v betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem může být vyjádřen hodnotou statického modulu pružnosti daného materiálu, který nám vyjadřuje právě poměr mezi napětím a přetvořením. Hodnota statického modulu pružnosti pro beton s přírodním kamenivem C 30/37 je zhruba 30 GPa, zatímco u betonu s recyklovaným kamenivem (stejně pevnostní třídy) se tato hodnota pohybuje výrazně pod 25 GPa. Hodnota dotvarování se v případě betonu s recyklovaným kamenivem může zvýšit až o 20 až 60 %. Ve výzkumech bylo prokázáno že se zvyšujícím se objemem recyklovaného kameniva použitého v betonové směsi, se dotvarování tohoto betonu zvyšuje. [43]

Mrazuvzdornost betonu je schopnost betonu v nasyceném stavu odolávat opakovaným cyklům zmrazování a rozmrazování. Tato vlastnost je jednou z nejdůležitějších ukazatelů při hodnocení trvanlivosti a životnosti betonu. Pokud beton není odolný vůči mrazu, po provedení zkoušky dochází k degradaci materiálu v podobě drolení povrchu betonu, snížené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu nebo modulu pružnosti. V případě betonu s recyklovaným kamenivem udávají výzkumy zabývající se odolností betonu proti mrazu rozdílné poznatky. Část vědeckých výzkumů uvádí, že beton s recyklovaným kamenivem dosahuje dobré či dokonce i lepší odolnosti než beton s kamenivem přírodním. Objevuje se i tvrzení, že odolnost betonu s recyklovaným kamenivem zlepšuje přidavek popílku či jiných minerálních přísad. V Belgii byl v roce 2016 proveden výzkum ohledně mrazuvzdornosti recyklovaných betonů jehož výstupem bylo velice kladné vyhodnocení, kdy po 30 zmrazovacích cyklech vyhověli všechny vzorky recyklovaného betonu předpisu maximálního úbytku $1,4 \text{ kg/m}^2$. Ovšem část výzkumů tvrdí opak a to, že beton s recyklovaným kamenivem dosahuje horších hodnot odolnosti proti mrazu. Lze tedy usoudit, že v případě této zkoušky velice záleží na kvalitě betonového recyklátu. [43] [45]

Při procesu **karbonatace** betonu dochází ke korozi jeho výztuže. Proces je způsoben reakcí oxidu uhličitého s látkami cementového tmele. V případě prostupu

zkarbonatované vrstvy k výztuži, dochází za přístupu kyslíku a vlhkosti ke korozi. Z literatury opět pocházejí rozporuplné informace. Část odborných výzkumů opět tvrdí, že recyklované kamenivo přidané do betonu karbonataci zpomaluje nebo je její hodnota minimálně stejná jako u betonu s přírodním kamenivem. Druhá část výzkumů zase tvrdí opak, dokonce uvádí zhoršení až o 100 %. Tyto protikladné informace mohou vycházet z odlišných vlastností betonového recyklátu ovšem v případě betonu s recyklovaným kamenivem je odolnost vůči karbonataci nižší z důvodu vyšší pórovitosti recyklovaného kameniva a tudíž i výsledného betonu. Pro lepší odolnost betonu vůči karbonataci může být do receptury přidán popílek. Koroze výztuže betonu může být způsobena i chloridy, které projdou betonem až k samotné výztuži, naruší její vrstvu a dále za přítomnosti kyslíku a vlhkosti dojde ke korozi. [43]



Obr. 23: Grafické zobrazení průniku karbonatace v závislosti na obsah hrubého RK [43]

Odolnost vůči pronikání chloridů je důležitou vlastností železobetonů. Degradace železobetonových konstrukcí je nejčastěji zapříčiněna korozí výztuže betonu. Pokud je průnik chloridů na kritické hodnotě, dochází za přítomnosti vzduchu a vlhkosti ke korozi výztuže. Samotný prostup chloridů je ve srovnání s karbonatací rychlejší (řádově mm za rok). Korodující výztuž se vyznačuje zvětšujícím se objemem, což v praxi znamená vytvoření trhlin v betonové matici a odlupování krycí vrstvy výztuže. V případě betonu s recyklovaným kamenivem je odolnost vůči pronikání chloridů nižší. Příčinou je zvýšená pórovitost kameniva a tedy i výsledná pórovitost betonu. Některé výzkumy potvrdili příznivý vliv popílku, přidaného do betonu, který nám zvyšuje odolnost betonu vůči pronikání chloridů. [43]

Alkalicko – křemičitá reakce kameniva je chemická reakce k níž dochází v betonu v případě že jsou přítomny tři reakční složky – alkálie, amorfni křemík a voda. Přítomnost alkálií může být způsobena cementem, amorfni křemík se v betonu vyskytuje kvůli některým kamenivům z určitých lomů. Tato reakce zapříčiní rozpínání betonu a následný vznik trhlin, popřípadě posun konstrukčních prvků nebo odprýskání povrchu. Při této reakci není možné konstrukci opravit, jelikož dochází k vnitřnímu trhání konstrukce. Alkalicko – křemičitá reakce je velice závažným problémem v betonu, obzvláště jedná se o beton s recyklovaným kamenivem. Není totiž docela možné určit množství alkálií a amorfniho křemíku v recyklovaném kamenivu, v praxi totiž při recyklaci není možné určit složení matečního materiálu. Východiskem se může stát použití (nebo alespoň nahrazení části cementu) cementem směsným, který obsahuje nižší podíl alkálií. A dalším řešením by mohl být chemický rozbor na vývrtech nebo částech konstrukce určené k výrobě betonového recyklátu. Tyto kalorimetrické zkoušky probíhají pomocí vodného roztoku rhodaminu B a hexanitrokobaltitanu sodného. Přítomnost produktů ASR se projeví barevným zbarvením. V případě rhodaminu B se objeví růžová barva a v případě zkoušky s hexanitrokobaltitanem sodným se objeví žlutá sraženina. Dalším možným postupem pro zjištění přítomných ASR produktů je použití mikroskopu. [43]

Modul pružnosti betonu vyjadřuje poměr mezi přetvořením a namáháním ztvrdlého betonu. V praxi to znamená, že čím vyšší je modul pružnosti, tím lepší je odolávání vyšším namáháním za vzniku menšího přetvoření. Pro beton C 25/30 s přírodním kamenivem je dle Eurokódu EN 1992-2 stanovena směrná hodnota modulu pružnosti 31 GPa. Ovšem u betonu s kamenivem recyklovaným klesá modul pružnosti se zvyšujícím se zastoupením betonového recyklátu. Pokud recyklované kamenivo nahrazuje to přírodní ve 100% zastoupení, klesá modul pružnosti průměrně o 30 %. Pokud se recyklované kamenivo objevuje jen do 20 %, modul pružnosti také klesá zhruba o 20 %. Hodnota modulu pružnosti se také snižuje s narůstající návrhovou pevností betonu zhruba o 14 až 22 %. Modul pružnosti se zvyšuje s narůstající pevností. Ovšem recyklované kamenivo má oproti přírodnímu kamenivu nižší tuhost, proto je zvyšování modulu pružnosti pozvolnější v porovnání s přírodním kamenivem. [46] [47]

5.3. Využití betonu s recyklovaným kamenivem

V současnosti již proběhlo několik projektů staveb, zahrnujících beton s recyklovaným kamenivem. Jedním z těchto projektů je výstavba nové výzkumné a laboratorní budovy pro humanitní vědy na Humboldtově univerzitě v Berlíně. V Berlíně se recyklovaný beton využíval ve velkém množství při výstavbě dopravní infrastruktury, kdy v roce 2013 bylo při této výstavbě spotřebováno více než 1 000 000 tun recyklovaného betonu. Ovšem nebyl ještě zcela využit jeho potenciál v pozemním stavitelství. Proto se právě v roce 2013 v Berlíně rozjel pilotní projekt, jehož cílem bylo překonat předsudky spojené právě s využíváním recyklovaného kameniva v konstrukčních betonech a zvýšit tak i jeho odbyt. Byla tedy vybrána plánovaná dostavba budovy na Humboldtově univerzitě a podmínkou stavby se stal právě recyklovaný beton. Rozsáhlý monitoring a zkoušení vhodné betonové směsi proběhlo na technické univerzitě v Brandenburku. Ovšem samotnou výrobu a dodávku betonu měla na starosti firma CEMEX Deutschland AG. Pro výstavbu čtyřpodlažní budovy bylo použito 3800 m³ betonu C 30/37 s poměrným zastoupením betonového recyklátu místo přírodního kameniva. Stupeň prostředí pro použitý beton byl zvolen XC3, což podle německé legislativy znamená 45% nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným. Recyklát se ve směsi objevil ve frakci 8/16 mm. Po výstavbě se tato budova přejmenovala na Rhoda-Erdmann-Haus po významné německé biologičce. [48]



Obr. 24: Stavba výzkumné budovy Humboldtovy univerzity [49]

Po úspěšném provedení tohoto pilotního projektu se v Berlíně zaměřili i na další výstavbu laboratorní budovy, tentokrát pro berlínský institut pro systém zdravotní péče v Max – Delbrück – Centru pro molekulární medicínu. Budova zahrnuje špičkové laboratoře, flexibilní pracovní prostory i ubytování pro výzkumné skupiny. Nová výzkumná budova poskytuje zhruba 4500 m² efektivní plochy. Je rozdělena na dvě propojené budovy z nichž jedna má tři patra a druhá šest pater. Všechny nosné konstrukce budovy včetně stěn, stropů a sloupů jsou udělány z betonu. Stavební práce byly zahájeny v roce 2015 a budova je připravena k použití od roku 2018. Beton použitý na výstavbu musel splňovat pevnostní třídu C30/37 a zahrnovat recyklované kamenivo splňující podmínky normy DIN EN 12620: 2008-07. Recyklované kamenivo muselo spadat do třídy Typu 1 (tedy drť nebo písek vyrobený drcením pouze betonu), muselo odpovídat určité ekologické kompatibilitě, Frakce použitého zrna byla 2/8 mm a 8/16 mm, objemová hmotnost byla 2350 kg/m³ a hmotnostní podíl recyklátu v betonu byl odpovídající stupni vlivu prostředí XC2 tedy 45 %. Na stavbu celého komplexu bylo užito 2500 m³ z toho zhruba 300 m³ byl použit beton se zvýšenou odolností proti pronikání vody. Celkové náklady na stavbu se pohybovaly okolo 33,5 milionu EUR, kdy použití recyklátu v této době bylo dražší než použití přírodního kameniva s ohledem na neznalost, nevyužití a neodborné zpracování recyklátu. V roce 2015 tedy byla zahájena výstavba a roce 2016 byla již dokončena výstavba betonové konstrukce. [50]



Obr. 25: Berlin Institute for Medical Systems Biology [51]

6. Experimentální část

6.1. Cíl

Cílem experimentální části je navrhnout tři receptury betonu různých pevností s recyklovaným kamenivem a kamenivem přírodním. Po návrhu receptur je zapotřebí tyto receptury ekonomicky porovnat a zhodnotit.

6.2. Návrh receptur

Navrhněte receptury betonů pro pevnostní třídy C 16/20, C 25/30 a C 30/37 s D_{max} 22 mm a konzistenci S3 s hrubým přírodním kamenivem a betonových recyklátem. Frakci 0/4 mm použijte přírodní kamenivo.

Návrh složení betonu dle ČSN 206+A1

1. Vodní součinitel

$$w = \frac{\alpha_k \cdot R_c}{R_b + 0,5 \cdot \alpha_k \cdot R_c} = \frac{0,5 \cdot 42,5}{20 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 42,5} = 0,69$$

w...Vodní součinitel

α_k ...Součinitel závislí na zrnitosti a původu kameniva

R_c ...Pevnost cementu v talku [MPa]

R_b ...požadovaná pevnost betonu [MPa]

2. Objem cementového tmele

$$V_{CT} = M_t + F \cdot \delta = 0,37 + 3688 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,407 \text{ m}^3$$

V_{CT} ...Objem cementového tmele [m^3]

M_t ...Mezerovitost v setřeseném stavu [m^3]

F... Povrchová plocha zrn kameniva [m^2]

δ ... Tloušťka vrstvy cementového tmele obalující zrna kameniva [m]

3. Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva
Dle FULLERA:

$$y_i = 100 \cdot \left(\sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right)$$

y_i ...propad sítem o velikosti i [%]

d ... velikost oka síta

D_{max} ... velikost ok největšího síta

$$y_4 = 100 \cdot \left(\sqrt{\frac{4}{22}} \right) = 43 \%$$

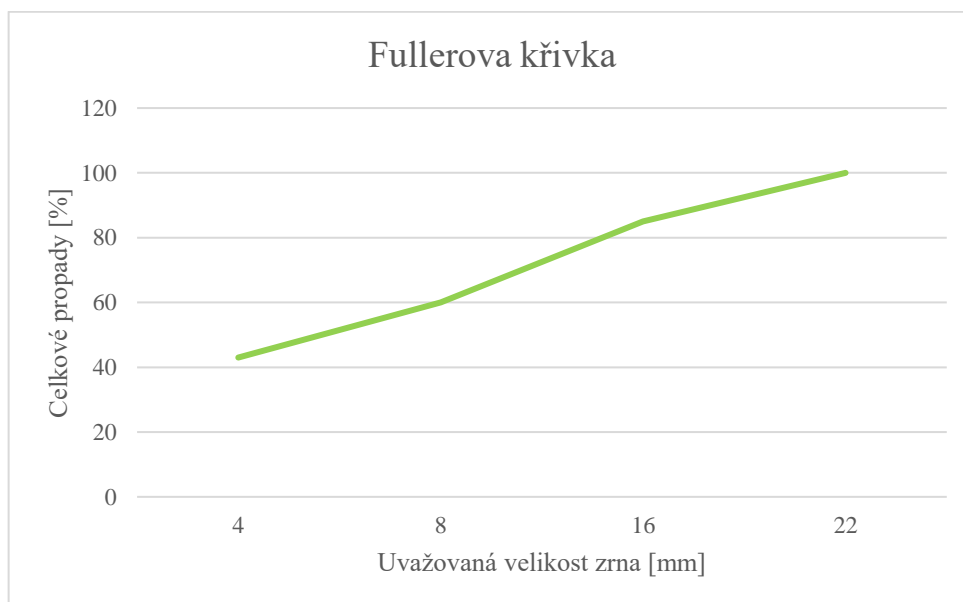
$$y_8 = 100 \cdot \left(\sqrt{\frac{8}{22}} \right) = 60 \%$$

$$y_{16} = 100 \cdot \left(\sqrt{\frac{16}{22}} \right) = 85 \%$$

$$y_{22} = 100 \cdot \left(\sqrt{\frac{22}{22}} \right) = 100 \%$$

Tab. 14: Tabulka druhu a množství použitého kameniva

Kamenivo	0-4	4-8	8-16	11-22	TĚŽENÉ	DRCENÉ
Množství [%]	43	17	25	15	85	15



Graf 5: Fullerova křivka kameniva

4. Mezerovitost kameniva

$$M_t = 1 - \frac{\rho_t}{\rho_k} = 1 - \frac{1700}{2700} = 0,37$$

M_t ...Mezerovitost setřeseného kameniva

ρ_t ...Sypná setřesená hmotnost směsi kameniva

ρ_k ...Objemová hmotnost zrn směsi kameniva

5. Koeficient závislosti na původu kameniva a tvaru zrn

$$f = f_t \cdot 0,83 + f_d \cdot 0,17 = 8 \cdot 0,85 + 10 \cdot 0,15 = 8,30$$

f ...koeficient závislosti na původu kameniva a tvaru zrn

f_t ...koeficient závislosti na původu kameniva a tvaru zrn pro těžené kamenivo

f_d ...koeficient závislosti na původu kameniva a tvaru zrn pro drcené kamenivo

6. Povrchová plocha zrn kameniva

$$F = f \cdot \frac{\rho_t}{\rho_k} \cdot \sum \frac{p}{d} = 8,30 \cdot 0,63 \cdot 705,3 = 3688 \text{ m}^2$$

F ...Povrchová plocha zrn kameniva

f ...koeficient závislosti na původu kameniva a tvaru zrn

ρ_t ...Sypná setřesená hmotnost směsi kameniva

ρ_k ...Objemová hmotnost zrn směsi kameniva

p ...Množství kameniva, které propadne sítím d_{n+1} a které zadrží síto d_n v % hmotnosti

d ... průměrná velikost zrna frakce

7. Výpočet množství cementu

$$m_c = \frac{V_{CT} - \frac{m_k \cdot p_{0,25}}{100 \cdot \rho_k}}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{w}{\rho_v} + \frac{\%m_p}{100\rho_p}} = \frac{0,407 - \frac{1700 \cdot 2,7}{100 \cdot 2700}}{\frac{1}{3110} + \frac{0,69}{1000} + \frac{0}{100 \cdot 2350}} = 385 \text{ kg}$$

w ...Vodní součinitel

m_c ...Hmotnost cementu

V_{CT} ...Objem cementového tmele [m^3]

m_k ...Hmotnost zrn kameniva, zde $m_k = \rho_t$

$p_{0,25}$...Procentuální zastoupení jemných částic kameniva menších než 0,25 mm

ρ_k ...Objemová hmotnost zrn směsi kameniva

ρ_c ...Objemová hmotnost cementu

ρ_v ...Objemová hmotnost vody

ρ_p ... Objemová hmotnost elektrárenského popílku

Z hlediska praktických zkušeností je dávka cementu pro pevnostní třídu C 16/20 vypočítána s vysokou odchylkou, k této odchylce mohlo dojít z důvodu teoreticky stanovovaného síťového rozboru kameniva. Z tohoto důvodu je pro další výpočty již konečných receptur betonových směsí množství cementu upraveno na 300 kg/m³.

8. Výpočet množství vody

$$m_v = m_c \cdot w = 300 \cdot 0,69 = 207 \text{ kg}$$

9. Výpočet množství kameniva

$$m_k = \rho_t = 1700 \text{ kg}$$

10. Výpočet přepočítacího koeficientu k_k pro přepočet množství složek na 1 m³ betonu

$$\sum V_i = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_p}{\rho_p} + \frac{V_z}{100} = \frac{300}{3110} + \frac{207}{1000} + \frac{1700}{2700} + \frac{0}{2350} + \frac{2}{100} = 0,95$$

$$k_k = \frac{1}{\sum V_i} = \frac{1}{0,95} = 1,05$$

11. Přepočet množství surovin na 1 m³

CEM I 42,5 R – 315 kg

VODA – 217 kg

KAMENIVO – 1785 kg

12. Výsledná receptura betonu C 16/20 pro objem 1 m³

Tab. 15: Množství surovin pro betonu C 16/20

Surovina	[kg]
CEMENT	315
VODA	217
KAMENIVO	1785
0-4 Žabčice	768
4-8 Olbramovice	303
8-16 Olbramovice	446
11-22 Olbramovice	268
DEN BRAVEN	-

13. Receptura betonu C 16/20, C 25/30 a C 30/37, $D_{\max} = 22 \text{ mm}$, S3 s přírodním a recyklovaným kamenivem

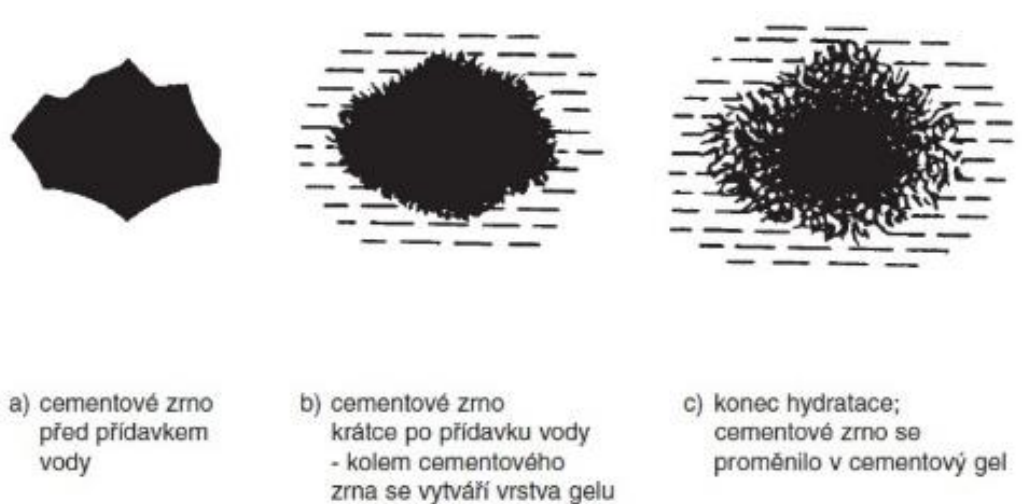
Tab. 16: Množství použitých surovin pro navrhované směsi

Pevnostní třída	C 16/20	C 16/20 R	C 25/30	C 25/30 R	C 30/37	C 30/37 R
Surovina	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
CEM I 42,5 R	315	292	348	329	377	356
VODA (nasáklý recyklát)	217	202	182	171	168	160
VODA (nenasáklý recyklát)	-	281	-	254	-	244
KAMENIVO	1785	1578	1819	1668	1830	1673
0-4 Žabčice	768	678	782	717	787	720
4-8 Olbramovice	303	-	309	-	311	-
8-16 Olbramovice	446	-	455	-	458	-
4-8 Recyklát	-	268	-	284	-	284
8-16 Recyklát	-	394	-	417	-	418
11-22 Olbramovice	268	237	273	250	275	251
DEN BRAVEN	-	-	1,5	1,8	2,1	2,0

6.3. Navrhované suroviny

6.3.1. Cement

Cement je jednou za základních složek betonu. Je to hydraulické pojivo, které se po smíchání s vodou mění na kaši, která dále v důsledku hydraulických procesů tuhne a tvrdne, cement je dále stálý i pod vodou.



Obr. 26: Proces vytváření cementové kaše [52]

Do všech navrhovaných receptur byl použit cement ze závodu Mokrý (Českomoravský cement a.s.), konkrétně cement CEM I 42,5 R.

Tab. 17: Základní vlastnosti CEM I 42,5 R

Surovina	Pevnost v tlaku – 2 den [MPa]	Pevnost v tlaku – 28 den [MPa]	Počátek tuhnutí [Min]	Konec tuhnutí [Min]	Měrná hmotnost [kg/m ³]
CEM I 42,5 R	30	59,1	194	260	3130

6.3.2. Kamenivo

Kamenivo frakce 0-4 mm je navrženo jako prané kamenivo ze Žabčic a frakce 4-8, 8-16 a 16-22 je kamenivo z kamenolomu v Olbramovicích. Cena kameniva byla odvozena z ceníků zmíněných kamenolomů. Kamenivo 0-4 mm Žabčice má cenu 180,- Kč za tunu materiálu. Kamenivo 4-8 z Olbramovic má cenu 420,- Kč za tunu, 8-16 mm má hodnotu 350,- Kč za tunu materiálu. A poslední frakce přírodního kameniva tedy 11-22 mm cenově vychází na 300,- Kč za tunu.

Recyklované kamenivo ve frakci 4-8 a 8-16 pochází z demolice a následné recyklace demoličního odpadu firmou Dufonev, kde byla cena recyklátu průměrně odvozená z jejich ceníku. Cena byla odvozená z důvodu v této době zatím stále malé poptávky po recyklovaném kamenivu užších a nižších frakcí. Recyklační střediska ještě stále recyklují demoliční odpad pro využití spíše jako násypů ve větších a širších frakcích, jelikož pro menší frakce není zatím dostatečný odbyt.

6.3.3. Plastifikační přísada

Plastifikační přísada je navrhována od značky Den Braven. Příklad u každé směsi byl 0,55 l plastifikační přísady na 100 kg cementu, tedy 0,55 % z hmotnosti cementu. Pouze v případě betonu C 25/30 s přírodním kamenivem je plastifikační přísady použito pouze zhruba 0,45 % z důvodu dodržení stupně konzistence. Plastifikační přísada byla navržena s ohledem na výslednou konzistenci betonu S3, dále pro zlepšení čerpatelnosti, zvýšení počáteční i konečné pevnosti a odolnosti proti mrazu. Cena plastifikační přísady je uvedena v korunách za litr.

6.3.4. Voda

Pro navrhovanou záměs byla použita pitná voda z vodovodního řádu. Cena vody byla odvozena z ceníku vodného i stočného pro město Brno v roce 2021. Výsledná cena tedy činí 85,- Kč za 1 m³.

6.4. Ekonomické náklady navrhovaných receptur

Tab. 18: Ekonomické náklady za 1 m³ betonu C 16/20

Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C 16/20					
Surovina	Množství [kg]	Množství [kg]	Cena [Kč/t]	Konečná cena [Kč]	Konečná cena [Kč]
CEM I 42,5 R	315	292	2000	630	584
VODA (nasáklý recyklát)	217	202	85	18,5	17,2
VODA (nenasáklý recyklát)	-	281	85	-	23,9
0-4 Žabčice	768	678	180	138,2	122,0
4-8 Olbramovice	303	-	420	127,3	-
8-16 Olbramovice	446	-	350	156,1	-
4-8 Recyklát	-	268	150	-	40,2
8-16 Recyklát	-	394	150	-	59,1
11-22 Olbramovice	268	280	300	80,4	84
DEN BRAVEN	-	-	87	-	-
$\Sigma =$				1151,- Kč	931,- Kč

Tab. 19: Ekonomické náklady za 1 m³ betonu C 25/30

Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C 25/30					
Surovina	Množství [kg]	Množství [kg]	Cena [Kč/t]	Konečná cena [Kč]	Konečná cena [Kč]
CEM I 42,5 R	348	329	2000	696	658
VODA (nasáklý recyklát)	182	171	85	15,5	14,5
VODA (nenasáklý recyklát)	-	254	85	-	21,6
0-4 Žabčice	782	717	180	140,8	129,1
4-8 Olbramovice	309	-	420	129,9	-
8-16 Olbramovice	455	-	350	159,2	-
4-8 Recyklát	-	284	150	-	42,6
8-16 Recyklát	-	417	150	-	62,6
11-22 Olbramovice	273	250	300	81,9	75
DEN BRAVEN	1,5	1,8	87	130,5	156,6
$\Sigma =$				1354,- Kč	1160,- Kč

Tab. 20: Ekonomické náklady za 1 m³ betonu C 30/37

Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C 30/37					
Surovina	Množství [kg]	Množství [kg]	Cena [Kč/t]	Konečná cena [Kč]	Konečná cena [Kč]
CEM I 42,5 R	377	356	2000	754	712
VODA (nasákly recyklát)	168	160	85	14,3	13,6
VODA (nenasákly recyklát)	-	244	85	-	20,7
0-4 Žabčice	787	720	180	141,6	129,6
4-8 Olbramovice	311	-	420	130,7	-
8-16 Olbramovice	458	-	350	160,1	-
4-8 Recyklát	-	284	150	-	42,6
8-16 Recyklát	-	418	150	-	62,7
11-22 Olbramovice	275	251	300	82,5	75,3
DEN BRAVEN	2,1	2,0	87	182,7	174
$\Sigma =$				1466;- Kč	1231;- Kč

Tab. 21: Výsledná cena všech navrhovaných receptur

Beton	C 16/20	C 16/20 R	C 25/30	C 25/30 R	C 30/37	C 30/37 R
Výsledná cena	1151;- Kč	931;- Kč	1354;- Kč	1160;- Kč	1466;- Kč	1231;- Kč

Kubík betonu bez recyklátu byl v průměru o 8 % dražší než vypočtená hodnota kubíku betonu s betonovým recyklátem. Cena recyklátu použita ve výpočtu je ovšem jedna z průměrných hodnot. Pokud bychom do betonu využili širší frakci, jako například 0-16, 0-32, 0-64 mm, náklady na recyklaci nejsou tak vysoké, ale jedná se o cenový rozsah 80-120 Kč/t. Průměrnou cenou za použitou frakci, tedy 4-8, 8-16 mm, je zhruba 150;- Kč/t. Ovšem některá recyklační střediska nabízí recyklát této frakce za cenu 300-350;- Kč/t. Pokud by byla tedy použita obširnější frakce za nižší cenu, dojde nejspíše ke zhoršení vlastností výsledného betonu, jelikož směs kameniva bude obsahovat vysoký podíl frakce do 4 mm, kdy je recyklované kamenivo tvořené převážně cementovým tmelem a je vysoce nasákavé. Pokud by byl ve výpočtu použit vzorek s nejvyšší cenou, tedy 300-350;- Kč/t dosáhli bychom vyšší ceny betonu s horšími vlastnostmi oproti betonu s přírodním kamenivem.

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zhodnotit možnost využití betonového recyklovaného kameniva v konstrukčních betonech s ohledem na jejich vlastnosti, které jsou odlišné oproti přírodnímu kamenivu a jejich dopad na výsledné vlastnosti betonu. V experimentální části jsem se dále zabývala finančními náklady surovin pro výrobu 1 m³ betonu a jejich porovnáním. V poslední době v České republice i v celé Evropě nastává problém s postupným vyčerpáváním zásob přírodního kameniva jakožto neobnovitelného zdroje surovin. Kamenivo jen v betonu zaujímá obecně až 75 % celkového objemu, proto je jeho spotřeba, jen pro stavební účely velice vysoká. Je proto potřebné vymyslet za přírodní kamenivo dostatečnou náhradu v podobě materiálu, který se bude svými vlastnosti alespoň blížit jeho vlastnostem. Stejně tak z důvodu velkého množství vznikajícího stavebního i demoličního odpadu, vznikla myšlenka recyklovaného kameniva.

Betonové recyklované kamenivo má oproti tomu přírodnímu snížené vlastnosti důležité z důvodu následného ovlivnění vlastností betonu z něj vyrobeného. Největším problémem betonového recyklátu je jeho přílišná nasákavost, proto se při výrobě betonu doporučuje recyklát předem nasáknout. Další vlastností je odlišná objemová hmotnost, která je u recyklovaného kameniva vždy nižší než u kameniva přírodního. A dalším problémem jsou chemické vlastnosti kameniva, kdy v případě recyklátu vzniklého ze stavebních demolic musíme počítat s množstvím nečistot (vápenné produkty, síra, atd.), které posléze mohou v kamenivu či betonu vyvolat chemickou reakci a tím narušit strukturu betonu.

Vlastnosti betonu jsou recyklovaným kamenivem ovlivněny v mnoha různých směrech. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu je nižší než u betonu s přírodním kamenivem, dále se snižuje pevnost v tlaku a to až o 15 %, modul pružnosti je také nižší a to dokonce až o 30 % a zvyšuje se součinitel dotvarování i smršťování. Vlastnosti betonu jsou také ovlivněny použitím přísad a příměsí, které mohou lehce dorovnat horší vlastnosti recyklátu a jejich dopady na vlastnosti betonu.

Konkrétní česká legislativa nebyla prozatím pro betonové recyklované kamenivo stanovena, proto předpisy čerpáme pouze z evropské normy EN 206 kde je obecně popsána procentuální náhrada přírodního kameniva právě betonovým recyklátem

s ohledem na vlivy prostředí. Toto procentuální zastoupení platí pro betony do pevnostní třídy C 30/37. V betonech, které jsou bez výztuže a kovových vložek v prostředí bez střídavého působení mrazu a rozmrazování, obrusu či chemicky agresivního prostředí (X0), a v betonech, které jsou vyztužené a nachází se ve velmi suchém prostředí (X0), můžeme betonovým recyklátem nahradit až 50 % přírodního kameniva. Další náhrada je proveditelná u betonů v prostředí, ve kterém dochází ke korozi vlivem karbonatace a to v prostředí suchém nebo stále mokřím (XC1) či prostředí mokřím nebo občas suchém (XC2), v tomto případě může být při výrobě betonu použito až 30 % betonového recyklátu. Stejně tak i v stupních prostředí XC3 a XC4, tedy v prostředí středně vlhkém, mokřím a střídavě mokřím a suchém. Dále může být betonový recyklát použit v betonech, v prostředí, kde je možný vznik karbonatace vlivem chloridů (ne z mořské vody) a to v prostředí středně mokřím či vlhkém (XD1) a jeho náhrada je opět 30 %. Betonový recyklát tohoto procentuálního zastoupení můžeme ještě využít v prostředí, kde se počítá s působením mrazu a rozmrazování ovšem bez rozmrazovacích prostředků, kdy beton je mírně nasycen vodou (XF1) a v prostředí kde je možné slabě agresivní chemické působení (XA1).

Ekonomické náklady, kterými jsem se zabývala v experimentální části, jsou nejvíce závislé na původu recyklátu a jeho frakci. Někteří dodavatelé nabízejí dražší recyklát, až o 100 – 200 Kč/t, ovšem tento recyklát má možná o něco lepší nebo stejné vlastnosti, jako recyklát, který je možné koupit levněji. Nejlevnější jsou pak betonové recykláty, které mají širší frakci, jelikož systém recyklace a třídění neprobíhá tak náročně. Nižší cena se týká většinou recyklátů frakcí 0-16,32,64 mm a tento recyklát se nehodí využívat do betonů, skrze jeho vysoce nasákavou a převážně cementem tvořenou frakci 0-4 mm. Pokud se tedy beton bude vyrábět z recyklátu dobrých vlastností a průměrné ceny, bude výsledná hodnota betonu za 1 m³ o zhruba 8 % nižší, než u betonu s kamenivem přírodním.

8. Seznam použitých zdrojů a literatury

1. Doc. Ing. Jiří Adámek, CSc., Ing. Bohumil Novotný, CSc., Ing. Jan Koukal. *Stavební materiály*. Brno : Akademické nakladatelství Cerm, s.r.o., 1997.
2. Prof. Ing. Petr Pytlík, CSc. *Technologie betonu*. Brno : VUT, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
3. RNDr. Jaromír Starý, Ph.D. et al. *Surovinové zdroje České republiky*. Praha : Česká geologická služba, 2019. ISBN 978-80-7075-988-2.
4. *Dopady těžby nerostných surovin na životní prostředí*. Taterová, Lucie. Praha : AMO, 2019.
5. <https://www.mzp.cz/>. *Zpráva o plnění cílů Plánu odpadového hospodářství České republiky*. [Online] [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/plneni_narizeni_vlady/\\$FILE/OODP-Zprava_plneni_POH_CR_2017_2018-20191217.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/plneni_narizeni_vlady/$FILE/OODP-Zprava_plneni_POH_CR_2017_2018-20191217.pdf).
6. Jan, Gazda. *Komoditní burzy a hospodaření se stavebním odpadem*. Praha : Fakulta stavební ČVUT v Praze, katedra společenských věd, 2008. ISBN 978-80-01-04200-7.
7. *Recycling 2020*. doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : Tribun EU s.r.o, 2020. ISBN 978-80-214-5894-9.
8. Mečislav, Kuraš. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim : Vodní zdroje Ekomonitor, 2014. ISBN 978-80-86832-80-7.
9. *Betonové konstrukce a udržitelný rozvoj*. Šrůma, Vlastimil, Šrůmová, Zuzana, Zděné a smíšené konstrukce 2004 (Praha, Česko). Praha : Česká betonářská společnost ČSSI (ČBS), 2004. ISBN 80-903501-2-7.
10. Křížová, Katarína. *Betonové konstrukce I pro SPŠ a SOU stavební*. Praha : Sobotáles, 2010. ISBN 978-80-86817-39-2.
11. Lenka Mynářová, Vladimír Víšek. *Inovace v cirkulární ekonomice. Incien*. [Online] únor 2019. [Citace: 22. duben 2020.] <https://incien.org/publikace/>.
12. *RECYCLING 2020 - Cirkulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a.* doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2020. ISBN 978-80-214-5894-9.
13. Duongová, Lan. Archizoom. *Cirkulární ekonomika aneb recyklace ve velkém*. [Online] 1. 10 2020. [Citace: 28. 4 2020.] <https://archizoom.cz/cirkularni-ekonomika-aneb-recyklace-ve-velkem/>. ISSN 2694-9539.
14. *Recycling 2011*. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : VUT Brno, 2011. ISBN 978-80-214-4253-5.
15. Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice. <http://www.arism.cz/>. [Online] <http://www.arism.cz/recyklaty.php>.
16. ARSM. Recyklace stavebních materiálů. 2017. <https://www.soliton.cz/putovni-vystavy/>.
17. Ing. Sylvia Szalayová, PhD. *Construction waste managment and recycling*. Brno : Tribun EU, s. r. o., 2017. ISBN 978-80-263-1338-0.
18. *Recycling 2006*. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006. 80-214-3142-3.
19. Juraj, Kizlink. *Odpady (sběr, zpracování, využití, zneškodnění, legislativa)*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-884-7.
20. ekologie, Odbor průmyslové. Ministerstvo průmyslu a obchodu. *Analýza současného stavu vybraných komodit druhotných surovin*. [Online] 20. 11 2018. [Citace: 22. 5 2021.] https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2019/8/Analyza_materialove-toky_PDS-CR.pdf.

21. Kizlink, Juraj. *Nakládání s odpady*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2007. ISBN 978-80-214-3348-9.
22. Resta. <https://www.resta.cz/>. [Online] Resta s.r.o. [Citace: 5. 1 2020.] <https://www.resta.cz/>.
23. Maršál, Petr. *Stavební stroje*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2774-4.
24. Svoboda, Ing. Karel. Technologie recyklace stavebních . *Odpadové fórum*. 2005.
25. Lidmila, Martin. *Possibilities for the usage of recycled materials in railway trackbed*. Praha : České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06434-4.
26. ČSN EN 206+A1. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. místo neznámé : Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Sv. 88s. 8596135044665.
27. Veselý, Ing. Vladimír. Současnost a perspektiva použití recyklovaného kameniva do betonu- poznámky a komentáře z pohledu legislativy. *Beton*. 2020, 121.
28. ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Sv. 52s.
29. GmbH, European Cement Research Academy. The concrete initiative. [Online] 27. 11 2015. [Citace: 20. 5 2021.] https://www.theconcreteinitiative.eu/images/Newsroom/Publications/2016-01-16_ECRA_TechnicalReport_ConcreteReuse.pdf.
30. Pedersen, Louise Green. Recycle of Concrete Aggregates. *Processing Procesures of Recycled Aggregates*. Denmark : autor neznámý, 2017.
31. Gonçalves, Paulo César Magalhães. COMMENTED ANALYSIS OF EXISTISTING LEGISLATION. *CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES*. Lisabon : autor neznámý, 2007.
32. Pavlů, Ing. Tereza. Zkoušení a vlastnosti recyklovaného kameniva pro použití do betonu. *tzbinfo*. [Online] <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10265-zkouseni-a-vlastnosti-recyklovaneho-kameniva-pro-pouziti-do-betonu>.
33. Ing. Iveta Nováková, Ing. Karel Mikulica. TZB-info. *Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva*. [Online] 16. 10 2018. [Citace: 20. 4 2021.] <https://m.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-faktory-ovlivnujici-kvalitu-recyklovaneho-betonoveho-kameniva?fbclid=IwAR3FaVNgc3nliJM7GWAGRJJPXKE5X8sKCMYyYhUnvddGvu1-N-WAe1FAeGIA>.
34. *RECYCLING 2013*. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : VUT, 2013. ISBN 978-80-214-4688-5 .
35. *Moderní beton*. Collepardi, Mario. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
36. *RECYCLING 2014*. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : VUT, 2014 . ISBN 978-80-214-4866-7 .
37. *Příprava a realizace staveb*. Jarský, Čeněk. Brno : CERM, 2003. ISBN 80-7204-282-3.
38. Ing. Zdeněk Prošek, Ing. Jan Trejbal, Ing. Vladimír Hrbek, Ing. Pavel Tesárek, Ph.D. *tzbinfo*. *Mechanická aktivace odpadního betonu: stanovení efektivity pro různé druhy odpadních betonů*. [Online] 25. 3 2019. [Citace: 5. 22 2021.] <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18808-mechanicka-aktivace-odpadniho-betonu-stanoveni-efektivity-pro-ruzne-druhy-odpadnich-betonu>. 1801-4399.

39. Catarina Neno, Jorge de Brito, Rosário Veiga. ACADEMIA. *Using fine recycled concrete aggregate for mortar production*. [Online] 4. 9 2016. [Citace: 22. 5 2021.] https://www.academia.edu/30668740/Using_fine_recycled_concrete_aggregate_for_mortar_production?fbclid=IwAR2Laf9z0Wk-DD75WYWQZXiqUfsSfCNcdLAqdz0JX5lQTW2za7Z3qiaZ58.
40. Nosek, Michal. e15.cz. *Revoluce ve stavebnictví. Český vynález umožňuje vyrábět beton ze suti*. [Online] 11. 7 2020. [Citace: 29. 4 2021.] <https://www.e15.cz/byznys/reality-a-stavebnictvi/revoluce-ve-stavebnictvi-cesky-vynalez-umoznuje-vyrabet-beton-ze-suti-1371413>.
41. skanska.cz. *Rebetong*. [Online] Skanska, 4. 10 2019. [Citace: 29. 4 2021.] <https://www.skanska.cz/co-delame/specialni-cinnosti/vyroba-dodavka-a-cerpani-betonu/rebetong/>.
42. Brabec, Richard. [<https://twitter.com/ribrarichard/status/1288483179771330560?lang=fi>] 2020.
43. *RECYCLING 2016*. Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc. Brno : VUT, 2016. ISBN 978-80-214-5331-9.
44. Chao-Qun Lye, Ravindra K. Dhir, Gurmeh S. Ghataora. Structures and Buildings. *Shrinkage of recycled aggregate concrete*. 2016. 0965-0911.
45. Joseph, Miquel & Boehme, Luc & ramses, broucke & len, falin. *Frost resistance of recycled concrete*. 2016.
46. Schoppe, Brett Michael. *Shrinkage & Modulus of Elasticity in Concrete with Recycled Aggregates*. San Luis Obispo : autor neznámý, 2011.
47. Lye, Chao, Dhir, Ravindra a Ghataora, Gurmeh. *Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates*. [Online] Institution of Civil Engineers, 2015. [Citace: 15. 5 2021.] <https://doi.org/10.1680/jstbu.15.00077>. 0965-0911.
48. Staff, CDR. CD recycler. *Cemex showcases specialty concrete with recycled aggregate in Germany*. [Online] 9. 12 2015. [Citace: 20. 5 2021.] <https://www.cdrecycler.com/article/cemex-specialty-recycled-aggregate-concrete-berlin/>.
49. CEMEX. *Pilot Project in Berlin Showcases Specialty Concrete with Recycled Aggregates*. [Online] 7. 12 2015. [Citace: 20. 5 2021.] <https://www.cemex.com/-/cemex-pilot-project-in-berlin-showcases-specialty-concrete-with-recycled-aggregates>.
50. Schwilling, Thomas. Evropská komise. *GPP In practice*. [Online] 2017. [Citace: 20. 5 2021.] https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/news_alert/Issue75_Case_Study_149_Berlin.pdf.
51. Noshe. World-Architects. *Berlin Institute for Medical Systems Biology*. [Online] [Citace: 20. 5 2021.] <https://www.world-architects.com/en/staab-architekten-berlin/project/berlin-institute-for-medical-systems-biology>.
52. CZ SVB, s.r.o. Cement. *eBeton.cz*. [Online] [Citace: 5. 22 2021.] <https://www.ebeton.cz/pojmy/cement>.

9. Seznam obrázků

Obr. 1: Ložiska stavebního kamene v České republice [3]	3
Obr. 2: Rozsah těžby a zásob stavebního kamene v letech 2014-2018 [3]	3
Obr. 3: Ložiska štěrkopísku v České republice [3]	4
Obr. 4: Rozsah těžby a zásob štěrkopísků v letech 2014-2018 [3]	4
Obr. 5: Množství a složení stavebního a demoličního odpadu v letech 2013-2018 [7]	6
Obr. 6: Princip lineární ekonomiky [11]	10
Obr. 7: Princip cirkulární ekonomiky ve stavebnictví [13]	11
Obr. 8: Druhy recyklátů [16]	12
Obr. 9: Schéma recyklace sestupného typu [18]	14
Obr. 10: Schéma recyklace vzestupného typu [18]	15
Obr. 11: Schéma technologie recyklace SDO [20]	17
Obr. 12: Stacionární recyklační linka [22]	18
Obr. 13: Semimobilní recyklační linka [22]	19
Obr. 14: Mobilní recyklační linka [22]	20
Obr. 15: Rozdělení kameniva dle ČSN EN 206+A1 [27]	21
Obr. 16: Porovnání čar zrnitosti přírodního a recyklovaného kameniva [32]	31
Obr. 17: Závislost měrné hmotnosti recyklovaného kameniva na absorpci vody [35]	32
Obr. 18: Ukázka rebetongu s cihelným a betonovým recyklátem [42]	36
Obr. 19: Grafické znázornění objemových hmotností [14]	38
Obr. 20: Grafické znázornění pevností v tlaku [14]	38
Obr. 21: Grafické porovnání pevnosti betonu s přírodním a recyklovaným kamenivem [43]	40
Obr. 22: Smrštění betonu s ohledem na procentuální zastoupení betonového recyklátu a relativní vlhkost [44]	41
Obr. 23: Grafické zobrazení průniku karbonatace v závislosti na obsahu hrubého RK [43]	43
Obr. 24: Stavba výzkumné budovy Humboldtovy univerzity [49]	45
Obr. 25 a 26: Berlin Institute for Medical Systems Biology [51]	46
Obr. 26: Proces vytváření cementové kaše [52]	51

10. Seznam tabulek

Tab. 1: Kategorie a kritéria dopadů staveb na životní prostředí [10].....	9
Tab. 2: Úroveň vybraných zemí EU v recyklaci SDO (údaje z publikace z roku 2011) [14]...	11
Tab. 3: Maximální procento nahrazení hrubého kameniva [27]	23
Tab. 4: Doporučení pro hrubé recyklované kamenivo podle EN 12620 [27]	23
Tab. 5: Přípustný obsah hmot v jednotlivých typech recyklátu [28].....	24
Tab. 6: Nasákavost a objemová hmotnost recyklátu po 10 minutách [28]	24
Tab. 7: Maximální procento nahrazení přírodního kameniva kamenivem recyklovaným [29] .	25
Tab. 8: Srovnání přípustného obsahu nečistot v betonových recyklátech i s EU [31].....	26
Tab. 9: Požadavky na vlastnosti recyklátu v různých státech [32]	26
Tab. 10: Zkoušené vzorky betonových recyklátů [33].....	28
Tab. 11: Objemové hmotnosti přírodního a recyklovaného kameniva [35].....	32
Tab. 12: Zkoušené množství cementu a vody [14]	37
Tab. 13: Doporučené množství recyklovaného kamenivo v závislosti na charakteristickou pevnost [35].....	41
Tab. 14: Tabulka druhu a množství použitého kameniva	48
Tab. 15: Množství surovin pro betonu C16/20	50
Tab. 16: Množství použitých surovin pro navrhované směsi.....	51
Tab. 17: Základní vlastnosti CEM I 42,5 R	52
Tab. 18: Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C16/20	53
Tab. 19: Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C25/30	53
Tab. 20: Ekonomické náklady za 1 m ³ betonu C30/37	54
Tab. 21: Výsledná cena všech navrhovaných receptur	54

11. Seznam grafů

Graf 1: Procentuální složení SDO v roce 2018 [7]	7
Graf 2: Obsah jemných částic v betonovém recyklovaném kamenivu [33].....	29
Graf 3: Nasákavost betonového recyklovaného kameniva [33].....	29
Graf 4: Objemová hmotnost kameniva ve vysušeném stavu [33].....	30
Graf 5: Fullerova křivka kameniva	48